

Dissertation

**Informationsassistentz
zur kognitiven Automatisierung
manueller Montagearbeitsplätze**

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing)

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

vorgelegt von

Mario Aehnelt

geboren am 30.01.1978 in Luckenwalde

wohnhaft in Hohen Schwarfs

Rostock, den 22. Dezember 2016

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Bodo Urban, Universität Rostock

Prof. Dr.-Ing. Kurt Sandkuhl, Universität Rostock

Univ.-Prof. Dr. Stefanie Lindstaedt, Technische Universität Graz

Einreichung: 22. Dezember 2016

Verteidigung: 19. April 2017

Zusammenfassung

Die kontinuierliche Digitalisierung verändert die Arbeitswelt nachhaltig. In der Konsequenz verändern sich damit die Rahmenbedingungen für das Arbeiten und die kognitiven Anforderungen an den Menschen. Dies trifft insbesondere auf den manuellen Montagearbeitsplatz zu, an dem sich die steigende Komplexität und Variabilität digitalisierter Arbeitsprozesse kanalisiert. Die vorliegende Arbeit stellt darum einen Ansatz zur Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse sowie zu der dazu erforderlichen Automatisierung der digitalen Informationsflüsse in der manuellen Montage vor. Er verbindet die beiden Disziplinen Informatik und Psychologie für die systematische Ableitung und Entwicklung technologischer Komponenten und Verfahren der kognitiven Informationsassistenten aus psychologischen Erklärungsmodellen für menschliches Verstehen und Handeln.

Durch den vorgeschlagenen Ansatz der kognitiven Informationsassistenten werden gezielt die kognitiven Arbeitsprozesse Denken, Lernen, Speichern und Erinnern als Teilprozesse der bewussten Handlungssteuerung des Menschen unterstützt. Dies geschieht in Abhängigkeit von den situativen Anforderungen der Montage und nach einem methodischen Grundgerüst, welches das psychologische Konzept der Team Cognition mit dem Prinzip des Cognitive Apprenticeship verbindet und für die technologische Gestaltung der Zusammenarbeit zwischen dem Menschen und dem kognitiven Informationsassistentensystem nutzt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die kognitiven Anforderungen an den Werker am manuellen Montagearbeitsplatz sowie die informationstechnischen Rahmenbedingungen zur Entwicklung einer Architektur für kognitive Informationsassistenten und die Konkretisierung der erforderlichen Komponenten und Verfahren eingesetzt. Diese Architektur wird mit Hilfe der kognitiven Architektur Soar exemplarisch durch das Plant@Hand Montageassistentensystem realisiert, welches den Werker automatisiert durch die Bearbeitung seiner Montageaufgaben führt und diese schrittweise mit Hilfe von Informationen aus den produktionsführenden Systemen und generierten Anweisungen anleitet. Der konzeptionelle Ansatz der kognitiven Informationsassistenten wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Vergleich zu einer klassischen Montageanleitung evaluiert, um so die Effekte auf die Qualität und den Wirkungsgrad in der manuellen Montage bewerten zu können. Dabei zeigte die Evaluation eine signifikante Reduzierung von Montagefehlern und eine signifikante Steigerung des Wirkungsgrades bei Einsatz der kognitiven Informationsassistenten.

Der wissenschaftlich-technische Beitrag der vorliegenden Arbeit sind damit die disziplin-übergreifenden Konzepte, Methoden und Verfahren zur Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse sowie zur Automatisierung der dazu erforderlichen Informationsflüsse.

Abstract

The continuous digitalization will have a lasting effect on the working world. It results in changing work conditions and cognitive requirements with respect to the human worker. Here, the manual assembly workplace is an outstanding example for the growing complexity and variety of digital work processes in manufacturing industries. This thesis presents a novel approach to support cognitive work processes and to automate corresponding information flows at the manual assembly workplace. It combines both disciplines, computer science and psychology, in order to systematically derive and develop the technological components and procedures of cognitive information assistance, based on the psychological models for human understanding and acting.

The proposed approach of cognitive information assistance aims at supporting the human thinking, learning, memorizing and remembering as sub-processes of conscious decision making. It addresses the situational dependency on changing assembly requirements and follows a methodological framework which combines the psychological models of team cognition and cognitive apprenticeship. Both are used for the technological engineering of collaboration between the human worker and the cognitive information assistance system.

In this thesis cognitive requirements at the manual assembly workplace as well as technological conditions are used to develop a generalized architecture for cognitive information assistance and to detail the corresponding components and procedures. This architecture was realized with the Plant@Hand assembly assistance system based on the cognitive architecture Soar. The assistance system automatically guides workers through the execution of assembly tasks and generates work instructions based on the current work situation and on provided data from manufacturing information systems.

The conceptual approach of cognitive information assistance was evaluated in comparison to traditional assembly manuals in order to analyze the effects on the quality and efficiency of the manual assembly. The evaluation showed a significant reduction decrease of assembly errors and a significant efficiency increase with the usage of cognitive information assistance.

The scientific and technical contribution of this thesis are the transdisciplinary concepts, methods and procedures for supporting cognitive work processes and to automate corresponding information flows.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1. Motivation und Zielstellung	3
1.2. Herausforderungen	5
1.3. Wissenschaftliche Fragestellung	7
1.4. Methodische Vorgehensweise und Organisation der Arbeit	8
2. Grundlagen und Begriffe	11
2.1. Cognitive Engineering	11
2.1.1. Kognitive Arbeitsanalyse	12
2.1.2. Kognitive Aufgabenanalyse	12
2.1.3. Zusammenfassung	13
2.2. Menschliches Verstehen und Handeln	14
2.2.1. Grundprinzipien der menschlichen Wahrnehmung	14
2.2.2. Grundprinzipien des menschlichen Lernens	16
2.2.3. Grundprinzipien des menschlichen Handelns	17
2.2.4. Zusammenfassung	18
2.3. Kognitive Informationsassistentz	19
2.3.1. Technische und kognitive Informationsverarbeitung	20
2.3.2. Konzept der kognitiven Automatisierung	23
2.3.3. Ziel der kognitiven Automatisierung	24
2.3.4. Grad der kognitiven Automatisierung	25
2.3.5. Anwendungsbereiche	26
2.3.6. Kognitive Architekturen	26
2.3.7. Zusammenfassung	29
2.4. Kognitive Automatisierung in der Montage	30
2.4.1. Kognitive Fabrik	30
2.4.2. Kognitiver Arbeitsplatz	31
2.4.3. Zusammenfassung	33
2.5. Zusammenfassung und Bewertung	33
3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage	35
3.1. Analysemethodik	36
3.2. Informationsverarbeitung in der Montage	39
3.3. Bereitstellung von montagerelevanten Informationen	43
3.4. Informationstechnische Einbettung eines kognitiven Informationsassistentzsystems in der Montage	47
3.5. Kognitive Arbeitsanalyse der Montage	48

3.6. Kognitive Aufgabenanalyse der Montage	52
3.7. Zusammenfassung und Bewertung	54
4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage	57
4.1. Prozess der kognitiven Informationsassistentz	59
4.1.1. Informations-, Kognitions- und Arbeitsprozesse	59
4.1.2. Prozessmodell für die kognitive Informationsassistentz	64
4.1.3. Zusammenfassung	66
4.2. Methodik der kognitiven Informationsassistentz	66
4.2.1. Zusammenarbeit durch Team Cognition	68
4.2.2. Zusammenarbeit durch Cognitive Apprenticeship	70
4.2.3. Anwendung für die kognitive Informationsassistentz	73
4.2.4. Zusammenfassung	79
4.3. Technologie der kognitiven Informationsassistentz	79
4.3.1. Entwicklung eines Architekturmodells	79
4.3.2. Interaktion mit der Montageumgebung	83
4.3.3. Modellierung von Handlungswissen im digitalen mentalen Modell	88
4.3.4. Digitale Handlungssteuerung	94
4.3.5. Datenintegration	98
4.4. Einsatz kognitiver Architekturen	103
4.4.1. Modellierung des digitalen mentalen Modells	104
4.4.2. Digitale Handlungssteuerung	108
4.5. Zusammenfassung und Bewertung	114
5. Plant@Hand Montageassistentz	117
5.1. Einsatzszenario	117
5.2. Hardwaretechnische Umsetzung	118
5.3. Softwaretechnische Umsetzung	120
5.3.1. Umsetzung des Datenflusses	121
5.3.2. Umsetzung der Sensorik	123
5.3.3. Umsetzung der Visualisierung	125
5.4. Methodische Umsetzung	127
5.5. Evaluation des Demonstrators	129
5.5.1. Testgruppe A	130
5.5.2. Testgruppe B	135
5.5.3. Vergleich der Testgruppen	141
5.5.4. Zusammenfassung	146
5.6. Zusammenfassung und Bewertung	147
6. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	149
6.1. Ergebnisse	149
6.2. Erkenntnisse	151
6.3. Ausblick	153

A. Dokumente der Analyse	155
A.1. Fragen an die Mitarbeiter in der Montage	155
A.2. Beispiel einer Montageanleitung mit Prozessbebilderung und 2D-Zeichnungen	157
B. Dokumente der Evaluation	159
B.1. Fragebogen zur Selbsteinschätzung	159
B.2. Beispielseiten aus der klassischen Montageanleitung	160
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	161
Literatur	163
Danksagung	177
Selbstständigkeitserklärung	179
Thesen	181

1. Einleitung

Die fortschreitende Digitalisierung der Arbeitswelt führt zu einem Wandel. Neue Technologien und Verfahren resultieren dabei in veränderten Prozessen und Strukturen. Damit ändern sich die Anforderungen an den Menschen, der Arbeitsprozesse ausführt und neue Technologien einsetzt. Informationen sind hier der Schlüssel zum Verstehen der kontinuierlichen Veränderungen und schließlich zum folgerichtigen Handeln.

Die steigenden Informationsmengen sowie die gewachsene Vielfalt verfügbarer Informationen führen im Zusammenhang mit dem Anstieg des Digitalisierungsgrades in der Arbeitswelt jedoch zu neuen Herausforderungen. Ein Beispiel hierfür ist die manuelle bzw. teilweise manuelle Fertigung von komplexen Maschinen und Anlagen. Durch die vierte industrielle Revolution, zum gegenwärtigen Zeitpunkt als *Industrie 4.0* bezeichnet, verändern sich gerade in diesem Bereich die Produktionsbedingungen und damit auch das Arbeitsumfeld des Menschen in hohem Tempo. Der Digitalisierungs- und Automatisierungsgrad steigt, während es parallel an Konzepten und Technologien für eine adäquate Einbindung des Menschen in die veränderten Fertigungsprozesse und -strukturen mangelt. Im Gegenteil führt die zunehmende Automatisierung sogar zu einer sinkenden Handlungsfähigkeit des Menschen und damit zu einem Anstieg informationsbedingter Fehler in der Produktion [MFBS14; Wic+10].

Dieser besonderen Herausforderung widmet sich das Thema der vorliegenden Arbeit. Der Mensch soll als wichtige Produktionsressource verstanden und in der kognitiven Verarbeitung relevanter Produktionsinformationen technisch unterstützt werden. Hierbei konzentriert sich die Arbeit auf den Bereich der manuellen Montage in einer diskreten Fertigung und damit auf die dort geltenden Rahmenbedingungen sowie Informationsbedarfe der Werker bezogen auf die auszuführende Montageaufgabe.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst das Thema sowie das Ziel der vorliegenden Arbeit näher motiviert bevor in Abschnitt 1.2 die besonderen Herausforderungen in diesem Zusammenhang erörtert werden. Anschließend wird in Abschnitt 1.3 die wissenschaftliche Fragestellung der Arbeit herausgearbeitet. Auf Basis dieser erfolgt in Abschnitt 1.4 die Darstellung der wissenschaftlichen Vorgehensweise zur Bearbeitung dieser Fragestellungen in Verbindung mit dem organisatorischen Aufbau der vorliegenden Arbeit.

1.1. Motivation und Zielstellung

In der industriellen Fertigung entfallen bis zu 40 Prozent der Kosten und sogar 70 Prozent der Produktionszeiten auf die Montage von Baugruppen und Endprodukten

1. Einleitung

[LW12]. Insbesondere bei der variantenreichen Fertigung in kleinen Losgrößen sind ein großer Anteil manueller Arbeitsgänge und nur ein geringer Automatisierungsgrad vorzufinden. Unter diesen Bedingungen unterstützen Assistenzsysteme den Werker bei der Ausführung seiner Arbeitsaufgaben. Sie helfen dabei nicht nur Zeiten und Kosten zu reduzieren, sie überwachen kontinuierlich die prozess- und qualitätssichere Ausführung seiner Arbeiten und tragen damit entscheidend zur Fehlervorbeugung und Störungsvermeidung bei.

Obwohl in der Fertigungsindustrie bereits mächtige und sehr spezialisierte Softwaresysteme zur Unterstützung der Produktionsplanung, der Produktionsüberwachung sowie zur Steuerung der operativen Produktionsprozesse eingesetzt werden, fehlen nach wie vor Methoden und Technologien, die automatisiert eine intelligente und situativ angepasste Form der Assistenz bis hin zum manuellen Arbeitsplatz auf Shop-Floor-Ebene ermöglichen. Hierbei besteht das hauptsächliche Problem in der Automatisierung der Informationsflüsse für die Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse. Diese Form der Automatisierung wird im Folgenden als *kognitive Automatisierung* [FB+13; TBM97] bezeichnet. Die vorliegende Arbeit soll hier einen wissenschaftlichen Beitrag zur Systematisierung und technologischen Unter-
setzung von Assistenzsystemen zur Informationsunterstützung, den *Informationsassistentensystemen*, als Bindeglied zwischen Technologien der Produktionsplanung und Produktionssteuerung sowie dem ausführenden Werker auf der Shop-Floor-Ebene leisten.

Ein Informationsassistentensystem wird dabei in der vorliegenden Arbeit als Technologie der kognitiven Automatisierung betrachtet, welche:

- die aktuelle Arbeitssituation des Menschen erfasst und deren Informationsbedarf ableitet, um passende Informationen zur Bedarfsdeckung aus heterogenen Quellen zusammenzuführen,
- die Informationsvermittlung in ihren Inhalten bzw. der Art und Weise an die Arbeitssituation des Menschen anpasst und
- aus dem Verhalten des Menschen und den Veränderungen seiner Arbeitsumgebung für zukünftige Arbeitssituationen neue Zusammenhänge zur Optimierung der Unterstützung erlernt.

Damit ist ein Informationsassistentensystem eine intelligente bzw. lernfähige Technologie, die selbständig Situationen analysiert und adäquate Entscheidungen trifft, den Prozess der Informationsunterstützung plant sowie das eigene Assistenzverhalten kontinuierlich optimiert. Eine wesentliche Aufgabe des Informationsassistentensystems ist dabei die zielgerichtete Vermittlung des zur Ausführung einer Arbeitsaufgabe erforderlichen Handlungswissens.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die systematische Entwicklung und Evaluation eines Lösungsansatzes für die Unterstützung der kognitiven Arbeit des Werkers zum Verstehen, Umsetzen und Kontrollieren seiner Montagetätigkeiten. Die Unterstützung

soll dabei durch eine gezielte Bereitstellung relevanter Informationen zur Montageanleitung während der Ausführung der Tätigkeiten und durch die begleitende Steuerung des Montageprozesses erfolgen. Die Arbeit zielt somit ebenso auf eine Automatisierung der Informationsflüsse am manuellen Montagearbeitsplatz und damit auf die Ablösung manuell erstellter Montageanleitungen.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich im Rahmen der Analyse, Konzeption und Umsetzung ausschließlich auf den Aspekt der kognitiven Automatisierung des Montagearbeitsprozesses und betrachtet nicht die Möglichkeiten einer zusätzlichen physischen Automatisierung. Hierbei ist bereits zu Beginn der Arbeit herauszustellen, dass die kognitiven Prozesse des Menschen mittelbar anhand der etablierten psychologischen Erklärungsmodelle betrachtet werden. Diese werden durch eigene situative Beobachtungen und Befragungen von Werkern ergänzt. Die Psychologie schafft hierbei durch ihre Erklärungsmodelle einen Verständnisrahmen für das Zusammenwirken der Zielgruppe Werker mit einem Informationsassistenzsystem. Die Informatik ermöglicht jedoch die Entwicklung eines technologischen Verfahrens zur kognitiven Unterstützung der Zielgruppe. Die Arbeit fokussiert sich damit nicht auf das individuelle Informationsbedürfnis des einzelnen Werkers während der Montage, sondern auf den Informationsbedarf der jeweiligen Montagesituation.

Im folgenden Abschnitt werden nun die besonderen wissenschaftlichen Herausforderungen, die mit dem Ziel der vorliegenden Arbeit verbunden sind, diskutiert.

1.2. Herausforderungen

Im vorangegangenen Abschnitt wurde das Ziel der vorliegenden Arbeit formuliert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Entwicklung eines Informationsassistenzsystems zur kognitiven Unterstützung des Menschen keine ausschließlich technologische Betrachtung voraussetzt. Vielmehr handelt es sich hierbei um die Konzeption und Entwicklung eines *soziotechnischen Systems*, welches auf einer engen Zusammenarbeit zwischen dem Menschen und der Assistenztechnologie beruht. Damit ist eine allgemeine Betrachtung des Menschen sowie seiner kognitiven Eigenschaften und Prozesse wichtig für das Verständnis der Arbeit sowie für die weitere Analyse und Entwicklung des Lösungsansatzes. Aus diesem Grund werden bereits zu Beginn der Arbeit die wissenschaftlichen Herausforderungen in den Aspekt *Mensch betreffend* sowie den Aspekt *Informationsassistenzsystem betreffend* unterteilt. Zunächst sollen die Herausforderungen, die sich auf den Menschen sowie seine Interaktion mit dem zu entwickelnden Informationsassistenzsystem beziehen, dargestellt werden:

- **Wahrnehmung:** Während der Ausführung physischer Handlungen ist der Mensch in seiner Wahrnehmung auf den Handlungsgegenstand fokussiert. Innerhalb dieses Wahrnehmungsbereiches können Informationen eingeschränkt erfasst werden, da ein Teil durch neurologische, soziale oder individuelle Filter ignoriert wird [Wic13; AL11; ZGG04]. Ein Informationsassistenzsystem ist folglich auf die Wahrnehmbarkeit und Wahrnehmungsbereitschaft des Menschen angewiesen, um Informationen bereitzustellen, die während physischer

1. Einleitung

Handlungen verarbeitet werden. Die Herausforderung besteht darin, eine organisatorische und technische Einbettung des Informationsassistentensystems in den Arbeitsprozess des Menschen zu finden, die zu einer Wahrnehmung der bereitgestellten Informationen führt.

- **Kognition:** Die menschliche Kognition ist individuell. Unterschiedliche Aspekte, wie zum Beispiel die Aufmerksamkeit, Motivation oder das Leistungsvermögen, beeinflussen die Interpretation und Verarbeitung von Informationen und damit die Handlungssteuerung sowie die Anwendung von Informationen innerhalb physischer Handlungen [Rea90]. Die Herausforderung besteht hier darin, den individuellen kognitiven Leistungen durch eine situativ anpassbare bzw. sich selbständig anpassende Informationsbereitstellung gerecht zu werden.
- **Akzeptanz:** Die Annahme der bereitgestellten Informationen durch den Menschen hängt von seiner Akzeptanz gegenüber dem Informationsassistentensystem ab. Die Grundlage für diese ist jedoch sein Vertrauen in die Richtigkeit der Informationen bzw. die Leistungsfähigkeit des Systems [ML13; PM09]. Ist das Vertrauen nicht gegeben, werden die bereitgestellten Informationen nicht als Hilfe wahrgenommen und damit alternative Informationsquellen gewählt. Dieser Zusammenhang wurde ebenfalls für den Bereich der Montage bestätigt [FB+13]. Die Herausforderung besteht demzufolge darin, eine für den Menschen verlässliche und nachvollziehbare Form der Informationsassistentenz durch die gezielte Anleitung des Menschen im Arbeitsprozesses in wechselnden Situationen zu erreichen.

Diese drei den Menschen betreffenden wissenschaftlichen Herausforderungen der vorliegenden Arbeit erfordern eine systematische Analyse der perzeptiven, kognitiven sowie verhaltensbezogenen Prozesse des Menschen im Kontext der Ausführung des Arbeitsprozesses. Hierbei konzentriert sich die vorliegende Arbeit jedoch hauptsächlich auf den Bereich der Kognition, um das Zusammenspiel zwischen dieser mit der Informationsassistentenz zu analysieren.

Aus der Sicht des Informationsassistentensystems bestehen darüber hinaus folgende wissenschaftliche Herausforderungen, die der vorliegenden Arbeit zugrunde liegen:

- **Modellierung:** Das Informationsassistentensystem muss die Arbeitssituation des Menschen in einer ähnlichen Art und Weise wahrnehmen sowie interpretieren, um eine adäquate Unterstützung durch Informationen bereitzustellen. Hierfür ist ein dem Menschen vergleichbares Hintergrundwissen zu den Arbeitsprozessen erforderlich, welches jedoch nicht formalisiert und damit nicht maschinen-interpretierbar vorliegt [BA14]. Die Herausforderung besteht hier darin, das erforderliche Hintergrundwissen zu identifizieren und anschließend zu modellieren, um so zur kognitiven Automatisierung des Arbeitsprozesses beizutragen.
- **Automatisierungsgrad:** Ein Informationsassistentensystem in der manuellen Montage automatisiert die Informationsflüsse zwischen den produktionsführenden

Informations- und Managementsystemen sowie dem Menschen. Das erfordert die Integration sowie Automatisierung der Informationen, Schnittstellen und Prozesse innerhalb der vorhandenen technologischen Infrastruktur und der natürlichen Arbeitsprozesse des Menschen [EIM12; Fas+09]. Die Herausforderung besteht darin, einen möglichst hohen Automatisierungsgrad in beide Richtungen (Mensch, Technik) zu erreichen, der damit eine Verbesserung der aktuellen Situation darstellt.

- **Wirkungsgrad:** Der Mensch in der manuellen Montage führt überwiegend physische Arbeitsprozesse aus. Die kognitive Verarbeitung von Informationen erfolgt dabei zur Vorbereitung und Kontrolle dieser. Fehler in der Interpretation der Arbeitsanweisungen führen in der Regel zu qualitativen Mängeln bezogen auf den Arbeitsprozess oder das Arbeitsprodukt [FB+13]. Die korrekte Aufnahme und Verarbeitung der durch das Informationsassistenzsystem bereitgestellten Informationen kann demzufolge nicht während der kognitiven Verarbeitung sondern erst am Ergebnis dieser Verarbeitung beurteilt werden. Die Herausforderung besteht nun darin, informationsbedingte Fehler durch eine gezielte Informationsbereitstellung zu vermeiden bzw. diese Fehler frühzeitig zu erkennen und angemessen zu intervenieren, um dennoch einen hohen Wirkungsgrad der kognitiven Automatisierung zu erreichen.

Diese drei das Informationsassistenzsystem betreffenden Herausforderungen bestimmen die technologischen Fragestellungen der vorliegenden Arbeit. Sie müssen jedoch in engem Zusammenhang mit dem Kognitionsprozess des Menschen betrachtet werden. Die dazu gewählte methodische Vorgehensweise wird in Abschnitt 1.4 zusammen mit dem organisatorischen Aufbau der Arbeit näher erläutert. Im Anschluss erfolgt nun die Diskussion der wissenschaftlichen Fragestellung, welche innerhalb der vorliegenden Arbeit bearbeitet wird.

1.3. Wissenschaftliche Fragestellung

Ein Informationsassistenzsystem verknüpft als soziotechnisches System die technischen Prozesse der Informationsbereitstellung mit den kognitiven Prozessen der Informationsverarbeitung, um so die wachsende Komplexität von Arbeitsaufgaben für den Menschen beherrschbar zu machen und gleichzeitig den Menschen in die zunehmend automatisierten Informationsprozesse zu integrieren. Bisher konnten wissenschaftliche Arbeiten wie zum Beispiel [MFBS14; FB+13; Sch13; EIM12; Wic+10] die Ursachen (z.B. Automatisierungsanstieg, Informationsüberlastung) und Folgen (z.B. Verlust der Übersicht, Fehleinschätzungen) dieser veränderten Arbeitsbedingungen belegen und erste Konzepte zur Lösung entwickeln. Eine integrierende Betrachtung, welche die kognitiven Prozesse des Menschen in Verbindung mit den technischen Prozessen des Informationsassistenzsystems als Ausgangspunkt für die Betrachtung der notwendigen technologischen Basiskomponenten nutzt, wurde jedoch noch nicht vorgenommen. Dies wird den wissenschaftlichen Kern der vorliegenden Arbeit bilden. Sie wird sich

1. Einleitung

daher mit der Fragestellung auseinandersetzen, welche technologischen Komponenten die kognitive Automatisierung und deren Anwendung zur Informationsunterstützung des Werkers in einer industriellen Montage begründen. Die vorliegende Arbeit wird dabei durch die folgenden Leitfragen geführt:

1. *Welche psychologischen Aspekte müssen bei der kognitiven Unterstützung der Arbeitsprozesse in der Montage berücksichtigt werden?*
2. *Welche technologischen Komponenten und Verfahren sind zur kognitiven Informationsassistentz erforderlich?*
3. *Wie müssen die technologischen Komponenten miteinander integriert werden, um die Automatisierung des Informationsflusses zu ermöglichen?*
4. *Welchen Einfluss hat die kognitive Informationsassistentz auf den Wirkungsgrad und die Qualität des Arbeitsprozesses?*

Diese Leitfragen werden dabei in engem Zusammenhang mit dem Anwendungsbe- reich der manuellen Montage einer industriellen Fertigung betrachtet. Das methodi- sche Vorgehen und der diesem folgende Aufbau der vorliegenden Arbeit wird jedoch im folgenden Abschnitt näher erläutert.

1.4. Methodische Vorgehensweise und Organisation der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Kapitel unterteilt. Diese folgen einem systematischen Vorgehen zur wissenschaftlichen Betrachtung und Entwicklung sowie Umsetzung des Lösungsansatzes für die kognitive Automatisierung durch eine Informationsun- terstützung von Arbeitsprozessen. Die Arbeit gliedert sich daher in die Analyse, Konzeption, Umsetzung und Bewertung dieses Lösungsansatzes (siehe Abbildung 1.1).

Dazu werden zu Beginn in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen zur Einordnung des Themas der Arbeit in die beiden Fachdisziplinen Informatik sowie Psychologie eingeführt. Dabei werden für das Verständnis der Arbeit relevante Fachbegriffe eingeführt und definiert. Darauf aufbauend erfolgt im gleichen Kapitel die Vorstellung der kognitiven Automatisierung. Es wird hierzu der aktuelle Forschungsstand zur kognitiven Automatisierung von Arbeitsprozessen in Abschnitt 2.3.2 im Allgemeinen und in Abschnitt 2.4 von Prozessen der manuellen Montage im Besonderen zur Analyse herangezogen.

In Kapitel 3 wird eine umfassende technische sowie kognitive Analyse des For- schungsrahmens der vorliegenden Arbeit vorgenommen. Durch den Einsatz von Methoden des *Cognitive Engineering* (siehe Abschnitte 2.1, 3.5 und 3.6) wird eine enge Verknüpfung der Analyse und Konzeption psychologischer und technologischer Aspekte des Themas vorgenommen. Hierdurch werden die informationstechnischen Rahmenbedingungen sowie die Anforderungen aus Sicht der Zielgruppe Werker in

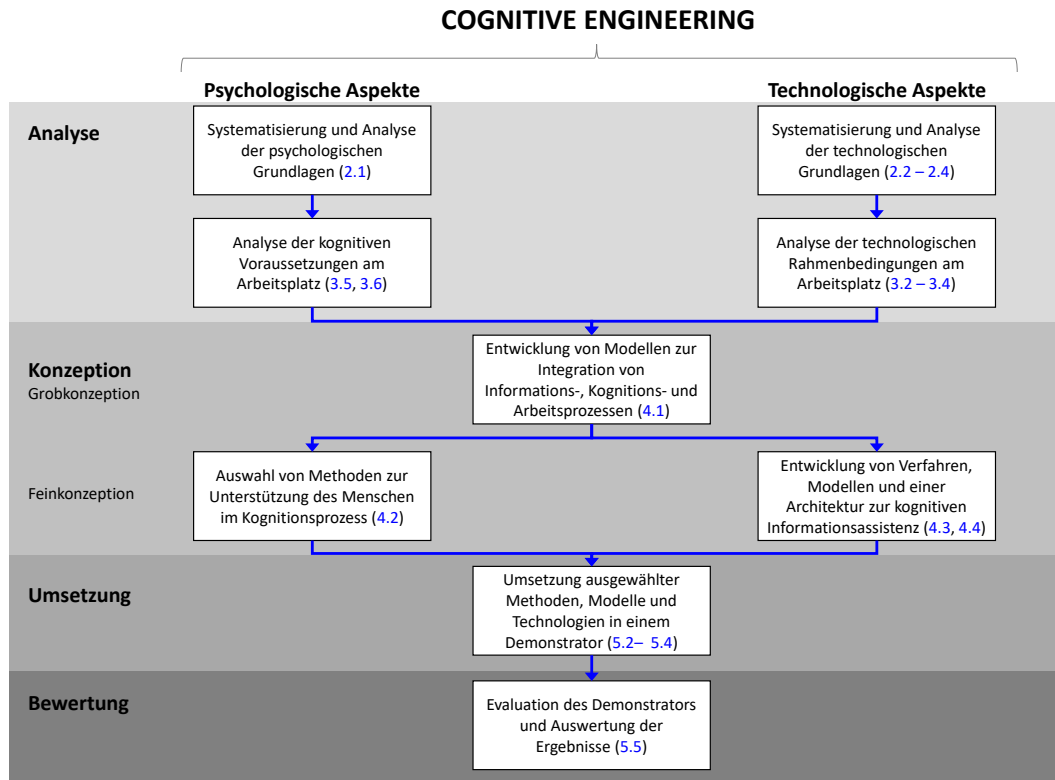


Abbildung 1.1.: Der inhaltliche Aufbau folgt der methodischen Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit und verbindet psychologische und technologische Aspekte über das Cognitive Engineering (siehe Abschnitt 2.1)

der manuellen Montage erarbeitet und in erste Modelle überführt, welche in der folgenden Konzeption aufgegriffen und als Basis für die konzeptionelle Entwicklung des Lösungsansatzes verwendet werden.

Das Kapitel 4 nimmt zunächst in Abschnitt 4.1 eine systemtheoretische Betrachtung der kognitiven Automatisierung zur Erarbeitung des Zusammenhangs zwischen Informations-, Kognitions- und Arbeitsprozessen vor, um damit ein allgemeines Prozessmodell für die kognitive Automatisierung zu entwickeln. Anschließend wird in Abschnitt 4.2 eine kognitions- und lernpsychologisch begründete Methodik zu ihrer Umsetzung erörtert bevor in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3 die technische Ausarbeitung des Lösungsansatzes erfolgt. Hierzu wird zunächst ein verallgemeinertes Architekturmodell der kognitiven Automatisierung entworfen, um darauf aufbauend eine technologische Konkretisierung dieses Modells vorzunehmen.

In Kapitel 5 erfolgt die Beschreibung der hardware- und softwaretechnischen Realisierung der zuvor erarbeiteten Modelle und Konzepte im *Plant@Hand Montageassistenzsystem*. Dabei werden umsetzungsrelevante Details sowie die vorgenommene Evaluation der kognitiven Unterstützung durch das Montageassistenzsystem beschrieben.

1. Einleitung

Abschließend erfolgt in Kapitel [6](#) eine Zusammenfassung der wissenschaftlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sowie ein Ausblick auf offene Fragestellungen.

2. Grundlagen und Begriffe

Das Thema dieser Arbeit verbindet die beiden Disziplinen Informatik und Psychologie. Während die Informatik als Wissenschaft die maschinen- bzw. computer-gestützte Informationsverarbeitung untersucht, setzt sich die Psychologie mit dem menschlichen Erleben und Verhalten auseinander. Die Entwicklung von Assistenzsystemen zur Unterstützung des Menschen erfordert eine integrierende Betrachtung beider Wissenschaftsdisziplinen. Daher ist diese Arbeit dem *Cognitive Engineering* zuzuordnen, welches einen interdisziplinären Forschungsansatz zwischen Informatik und Psychologie zur Analyse, Modellierung und dem Design von Technologien zur computer-gestützten Assistenz am Arbeitsplatz verfolgt [LK13].

In diesem Kapitel werden wichtige Erkenntnisse aus den jeweiligen, relevanten Forschungsgebieten der Informatik und Psychologie zusammengetragen. Diese werden für eine wissenschaftliche Einordnung sowie Bewertung des Themas der Arbeit genutzt. Parallel werden zum besseren Verständnis wichtige Begriffe aus den beiden Disziplinen eingeführt bzw. definiert.

In Abschnitt 2.1 werden relevante Methoden des Cognitive Engineering erläutert, da diese zu einem späteren Zeitpunkt eingesetzt werden. Darauf folgt in Abschnitt 2.2 eine Betrachtung der psychologischen Aspekte menschlichen Verstehens und Handelns bevor in Abschnitt 2.3 der Übergang zu Aspekten der Informatik vollzogen wird, um so die erforderlichen Grundlagen von Informationsassistenz und kognitiver Automatisierung einzuführen. Abschließend wird in Abschnitt 2.4 der Fokus auf die kognitive Automatisierung in der Montage gesetzt, um hier den wissenschaftlichen Forschungsbedarf zu identifizieren.

In Abschnitt 2.5 werden die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Abschnitten zusammengefasst und mit Bezug zum Thema sowie zur wissenschaftlichen Problemstellung der Arbeit bewertet.

2.1. Cognitive Engineering

Das *Cognitive Engineering* hat sich als weitgehend eigenständiger Forschungsbereich zwischen Kognitionspsychologie, Human Computer Interaction bzw. Human Factors, Systems Engineering und Usability Engineering etabliert. Es stellt ein methodisches Gerüst für die Entwicklung von Lösungen durch eine systematische Analyse der kognitiven Prozesse in Verbindung mit Arbeitssituationen zur Verfügung. Wesentliche Methoden im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit sind die kognitive Arbeitsanalyse sowie die kognitive Aufgabenanalyse. Diese ermöglichen eine umfassende Erhebung, Bewertung und Kommunikation der Strukturen, Prozesse und Randbe-

2. Grundlagen und Begriffe

dingungen kognitiver Arbeit. Beide Methoden werden in den folgenden Abschnitten zusammenfassend dargestellt.

2.1.1. Kognitive Arbeitsanalyse

Die *kognitive Arbeitsanalyse* (Cognitive Work Analyses, CWA) kann im Zusammenhang dieser Arbeit als eine wesentliche Analysemethode betrachtet werden. Sie ermöglicht eine systematische Analyse des Arbeitsumfeldes auf fünf Ebenen [RB13]: Arbeitsdomäne, Arbeitsaufgaben, Strategien, soziale Organisation sowie Kompetenzen. Auf diesen Ebenen werden der Arbeitskontext, Arbeitsbedingungen und Einschränkungen beschrieben und analysiert.

Die Analyse der Arbeitsdomäne ist dabei der Ausgangspunkt für die Analyse auf den weiteren Ebenen. Sie beinhaltet die Betrachtung der physischen Arbeitssysteme (Werkzeuge, Artefakte) der natürlichen Arbeitsumgebung mit ihren Einflussfaktoren (Licht, Temperatur) auf die Arbeitsprozesse sowie die sozialen Randbedingungen (Regelungen, Gesetze, Hierarchien). Die Analyse der Arbeitsaufgaben konzentriert sich hingegen auf die zur Ausführung der Arbeit erforderlichen Kontrollaufgaben. Diese werden in Zusammenhang mit den Arbeitssituationen funktional betrachtet und in Form von Aktivitätsdiagrammen [NMP06] bzw. Entscheidungsdiagrammen nach Rasmussen [RPG94] dokumentiert. Auf der Strategieebene werden die bisher gesammelten Analyseergebnisse abstrahiert und in personenunabhängige Arbeits- und Lösungsstrategien überführt. Die Analyse der sozialen Strukturen untersucht die organisationale und soziale Aufteilung von Arbeitsaufgaben sowie die Kommunikationswege und Kooperationsgefüge innerhalb der Arbeitsausführung. Abschließend werden die zur effektiven Arbeit erforderlichen Kompetenzen der Mitarbeiter untersucht. Diese Analyse hängt wiederum stark von den vorangegangenen Analyseebenen ab. Hierfür lässt sich Rasmussens Taxonomie der Fähigkeiten, Regeln und des Wissens [Vic99; Ras83] methodisch einsetzen.

Die kognitive Arbeitsanalyse ist eine qualitative Methode. Sie lässt sich mit der kognitiven Aufgabenanalyse kombinieren, um so zum Beispiel detailliertere Aussagen über die metakognitiven Prozesse zu gewinnen, die in der kognitiven Arbeitsanalyse weniger Berücksichtigung finden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Methoden zur Analyse der Arbeitsdomäne und dort des direkten Wirkungsumfeldes in der manuellen Montage verwendet. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in Abschnitt 3.5 vorgestellt.

2.1.2. Kognitive Aufgabenanalyse

Die *kognitive Aufgabenanalyse* (Cognitive Task Analysis, CTA) bezeichnet eine Methode zur systematischen Untersuchung und Bewertung der kognitiven Problemlösungsprozesse insbesondere in kritischen Arbeitssituationen, z.B. unter Zeitdruck, Informationsmangel oder stetig wechselnden Ausgangsbedingungen [CH13]. Sie setzt sich aus den drei Phasen Wissenserhebung, Datenanalyse sowie Datendarstellung zusammen. Für die Wissenserhebung werden unterschiedliche Werkzeug-

ge und Methoden eingesetzt, wie zum Beispiel Wissensaudits, Prozessdiagramme, Konzept-Mapping oder die Beobachtung von Arbeitsmustern bzw. Reflektion kritischer Entscheidungen. In dieser Phase werden die Arbeitsaufgaben in engem Bezug zum Arbeitskontext betrachtet und dokumentiert. Dabei untersuchen die Methoden insbesondere die makrokognitiven Prozesse der Problemanalyse, Antizipation, Planung, Entscheidungsfindung und Operationalisierung [Kle+03]. Anschließend werden vorrangig quantitative aber auch qualitative Analysemethoden zur Auswertung eingesetzt. Dabei werden wiederkehrende Muster und Kategorien klassifiziert, Chronologien und strukturierte Prozesse extrahiert und in Bezug zu normativen Bewertungskriterien gesetzt. Die Darstellung der Ergebnisse ist schließlich abhängig von den zuvor gewählten Analysezielen bzw. Analysemethoden.

Crandall und Hoffmann verweisen in ihren Ausführungen [CH13] auf besondere Herausforderungen für die Analyse im Zusammenhang mit Assistenzsystemen. Durch deren Einsatz verändern sich in der Regel die kognitiven Anforderungen des Menschen. Diese begründen sich in einer zusätzlichen Arbeitskomplexität durch die Anwendung bzw. Bedienung des Assistenzsystems sowie durch die damit einhergehende ungenaue Abbildung der mentalen Modelle des Menschen.

In der vorliegenden Arbeit wird die kognitive Aufgabenanalyse zur Begutachtung und Modellierung der kognitiven Arbeitsprozesse des Werkers während der manuellen Montage herangezogen. Die Ergebnisse der Analyse werden hierzu in Abschnitt 3.6 beschrieben.

2.1.3. Zusammenfassung

Ein Informationsassistenzsystem zur Automatisierung des Informationsflusses am Montagearbeitsplatz sowie zur Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse des Werkers, dem Ziel dieser Arbeit, erfordert eine systematische und methodische Herangehensweise an die Gestaltung der technischen und menschlichen Informationsverarbeitung. Dabei hat die technische Informationsverarbeitung einen unmittelbaren Einfluss auf die Qualität der kognitiven Arbeitsprozesse des Menschen [AU14].

Cognitive Engineering bietet hier ein umfangreiches methodisches Grundgerüst für die systematische Analyse von Arbeitsprozessen und dem Arbeitsumfeld mit spezifischem Fokus auf individuelle kognitive Prozesse des Menschen und ihre informationstechnische Berücksichtigung [LK13]. Hier adaptiert die Arbeit die zuvor vorgestellten Methoden zur kognitiven Arbeits- sowie Aufgabenanalyse [CH13; RB13]. Sie werden in Abschnitt 3.5 zur systematischen Analyse des Wirkungsumfeldes in der Montage und in Abschnitt 3.6 zur Analyse der kognitiven Entscheidungsprozesse des Werkers während der Montage verwendet.

Die Grundvoraussetzung für die Anwendung von Methoden des Cognitive Engineering ist jedoch das Verständnis über die generellen Prinzipien und allgemeine Funktionsweise der menschlichen Kognition. Aus diesem Grund fasst der nachfolgende Abschnitt die für diese Arbeit relevanten Erkenntnisse zusammen, bevor mit einer technologischen Grundlagenbetrachtung fortgefahren wird.

2.2. Menschliches Verstehen und Handeln

Die Psychologie betrachtet als Wissenschaft in ihren Teildisziplinen die unterschiedlichen Ebenen menschlichen Erlebens und Verhaltens. Hier werden neue Erkenntnisse durch das empirische Untersuchen von Zusammenhängen auf der Basis theoretischer *Erklärungsmodelle* gewonnen. Dabei handelt es sich um auf wesentliche Sachverhalte reduzierte Abbilder des menschlichen Erlebens und Verhaltens, die durch Experimente, Beobachtungen bzw. Befragungen gewonnen sowie validiert werden und dem Erklären von Zusammenhängen, Ursachen und Wirkung dienen.

Für das Thema dieser Arbeit sind insbesondere die *allgemeine Psychologie*, *pädagogische Psychologie* sowie die *Arbeitspsychologie* von Bedeutung. Die allgemeine Psychologie beschäftigt sich mit den grundlegenden Aspekten des Erlebens und Verhaltens von Menschen, zum Beispiel mit der Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Kognition, dem Gedächtnis, der Motivation oder dem menschlichen Lernen. Durch die pädagogische Psychologie werden insbesondere psychologische Fragestellungen im Zusammenhang mit menschlichen Lern- und Lehrprozessen untersucht. Die Arbeitspsychologie setzt sich als Unterdisziplin der Wirtschaftspsychologie hingegen mit psychologischen Aspekten im Bereich einer Arbeitstätigkeit auseinander, zum Beispiel mit der menschlichen Belastung oder Beanspruchung im Arbeitsumfeld.

Die folgenden Abschnitte erläutern wesentliche Erkenntnisse und Begriffe aus den drei genannten psychologischen Teildisziplinen. Sie bilden die Grundlage für die spätere Betrachtung der informationstechnischen Aspekte, die jedoch jeweils in direktem Bezug zu Prozessen des menschlichen Verstehens und Handelns stehen.

2.2.1. Grundprinzipien der menschlichen Wahrnehmung

Die menschliche Wahrnehmung (*Perzeption*) umfasst alle Prozesse zur unbewussten Strukturierung und Interpretation von Informationen aus Abbildern, die über Reize und biochemische Vorgänge von Sinnesorganen erfasst werden [ZGG04]. Über diese Prozesse nimmt der Mensch sich selbst und seine Umwelt wahr. Sie ermöglichen ihm damit erst eine situationsangemessene Verhaltensweise.

Über seine Sinnesorgane kann der Mensch *Sinneswahrnehmungen* in unterschiedlichen Modalitäten erfassen, so zum Beispiel visuelle Wahrnehmungen über das Auge. Die Sinnesorgane erfassen ausschließlich Reize oberhalb menschlicher und individueller Reizschwellen. Das periphere Nervensystem sorgt für eine Weiterleitung der Reize an das zentrale Nervensystem. Dort und insbesondere in spezialisierten Arealen des Gehirns werden diese schließlich verarbeitet und es erfolgt ein unbewusster Reflex bzw. eine bewusste Reaktion.

Bereits 1964 untersuchten Rock und Victor den Einfluss der menschlichen Wahrnehmung auf die Interpretation der Umwelt [RV64]. Sie konnten zeigen, dass unterschiedliche jedoch redundante Sinneswahrnehmungen (z.B. visuelles und taktilen Erfassen eines Objektes) miteinander integriert werden, wenn sie zu einem einzelnen, widerspruchsfreien Sinneseindruck führen. Hierbei sorgt das individuelle Erfahrungswissen sowie eine Dominanz einzelner Modalitäten für eine Optimierung

der Integration der multimodalen Reize (*multimodale Integration*). Insbesondere jedoch wenn sich Sinneseindrücke widersprechen, wird die plausibelste und damit wahrscheinlichste Interpretation gewählt. So kann der Sinneseindruck des Gesehenen zum Beispiel das Getastete überlagern, wenn die ertastete Oberfläche eines Objektes aufgrund der bisherigen Erfahrungen nicht dem erwarteten Aussehen entspricht. Dadurch können unterschiedliche Menschen gleiche Sinneseindrücke auf teilweise sehr unterschiedliche Art und Weise interpretieren. Aufbauend auf diesen Beobachtungen wurde die menschliche Informationsverarbeitung mit dem Ziel untersucht, allgemeingültige Aussagen zu Wechselbeziehungen zwischen Wahrnehmung und Interpretation des Wahrgenommenen treffen zu können. Nach Rasmussen et al. [RPG94] können drei wesentliche Komponenten der Informationsverarbeitung unterschieden werden. Das *primäre Verarbeitungssystem* beinhaltet die bereits zuvor beschriebenen Wahrnehmungs- und Aufmerksamkeitsprozesse zur direkten Aufnahme und Erstverarbeitung der Reize. Das *dynamische innere Weltbild* bzw. *mentale Modell* vergleicht die im primären Verarbeitungssystem aufgenommenen Informationen auf Übereinstimmung und Abweichungen bezogen auf ein individuell erlerntes Abbild der Umwelt. Bei Abweichungen wird das *sekundäre Verarbeitungssystem* eingesetzt um diese näher zu bewerten, z.B. durch Einsatz des Langzeitgedächtnisses oder die Intensivierung der Beobachtung. Es leitet darauf aufbauend Korrekturen der eigenen Handlungen (siehe Abschnitt 2.2.3) ein. Die unterschiedliche Ausprägung des mentalen Modells hat somit einen entscheidenden Einfluss auf eine erste Bewertung der wahrgenommenen Reize. Je weniger diese den Erfahrungen bzw. Erwartungen entsprechen, desto komplexer fällt die zusätzliche Interpretation im sekundären Verarbeitungssystem aus.

Ein weiterer Faktor ist die menschliche *Aufmerksamkeit*. Sie grenzt den Wahrnehmungsbereich situationsabhängig ein. Abhängig von der individuellen Konstitution und Situation des Menschen unterliegt dabei die Qualität der menschlichen Wahrnehmung zeitlichen Schwankungen [AL11]. Diese können zum Beispiel durch Ermüdung, Überlastung, Gewöhnung aber auch durch die teilweise bewusste Auswahl von Reizen hervorgerufen werden. In der Forschung werden hierfür unterschiedliche Erklärungsansätze diskutiert. Nach der *Kapazitätstheorie* ist das Wahrnehmungsvermögen des Menschen in seiner Kapazität natürlich beschränkt. Die Selektivität erklärt sich dabei durch die Reduktion des Wahrnehmungsgegenstandes auf innerhalb der individuellen Kapazitäten verarbeitbare Mengen. Die *Tätigkeitstheorie* von Allport erklärt die Selektivität hingegen durch eine zielgerichtete Fokussierung des Menschen auf für seine Tätigkeiten relevante Wahrnehmungsgegenstände [All87]. Unwesentliche Gegenstände bzw. Bereiche der Wahrnehmung werden so nachrangig wahrgenommen oder vollständig ignoriert. Die Mechanismen der menschlichen Aufmerksamkeit sind bisher jedoch nicht abschließend geklärt. Sicher ist, dass die Wahrnehmungsprozesse und damit auch die nachfolgenden kognitiven Verarbeitungsprozesse durch individuelle und teilweise unbewusste Aufmerksamkeitsfilter beeinflusst werden. Diese reduzieren das insgesamt Wahrgenommene und folglich wirken sie sich auf das Empfinden, Speichern und Erinnern von Sinneseindrücken aus.

2.2.2. Grundprinzipien des menschlichen Lernens

Lernen bezeichnet die Änderung der menschlichen Verhaltensweise auf Basis von persönlichen Erfahrungen [ZGG04].

Es werden drei wesentliche Erklärungsmodelle für das menschliche Lernen unterschieden: Behaviorismus, Kognitivismus und Konstruktivismus. Der *Behaviorismus* erklärt die einfachste Lernform, das Lernen durch Analyse eigenen Verhaltens und dessen Anpassung. Hierbei erfolgt eine kontinuierliche Beobachtung der Umwelt sowie Introspektive und Ausrichtung der eigenen Verhaltensweisen auf Erfolg. Dieser Zusammenhang wurde für die gezielte Konditionierung von erwünschten Verhaltensweisen durch äußere Stimuli [Pav03] oder Verstärkersysteme [Ski76] eingesetzt. In der *klassischen Konditionierung* werden zunächst getrennte Reize durch Anlernen einer stimulierenden Reiz-Reaktions-Kette miteinander verknüpft. Das Auftreten eines Einzelreizes führt im Ergebnis des Lernprozesses zur Ausführung der erlernten Reaktion. Bei der *operanten Konditionierung* wird ein positives bzw. negatives Verstärkersystem (Belohnung, Bestrafung) mit dem Auftreten eines Verhaltens verknüpft. Hierbei führt das Vermeiden einer negativen und das Erreichen einer positiven Verstärkung zu einer Verhaltensänderung und damit zum Erlernen gewünschter Verhaltensweisen.

Der *Kognitivismus* verwendet hingegen aktive kognitive Prozesse des Menschen als Erklärungsansatz. Lernen entsteht dabei nicht durch den Einfluss der Umwelt sondern durch die gezielte Aufnahme, Verarbeitung und Interpretation von Informationen aus der Umwelt [Bru66]. Nach Bruner wird Lernen durch drei wesentliche Prozesse qualifiziert: durch das Aneignen, das Umwandeln und Bewerten von Informationen. Das Aneignen von Informationen ist dabei mit dem Ziel verbunden auf ein Informationsbedürfnis bzw. Informationsmangel zu reagieren. Durch die Transformation dieser angeeigneten Informationen werden sie für neue Anwendungskontexte nutzbar gemacht. Die Zweckmäßigkeit der angeeigneten Informationen und ihrer Anpassung wird anschließend bewertet und führt zu neuen Erkenntnissen und einer aktiven Rückkopplung im Lernprozess.

Durch den *Konstruktivismus* wird die Individualität des Menschen noch stärker in den Mittelpunkt gerückt. Lernen erfolgt so ausschließlich durch persönliches Erfahren, Erleben und Interpretieren. Es führt zu einer individuellen Konstruktion von Wissen. Reich, ein Hauptvertreter des interaktionistischen Konstruktivismus, betrachtet dabei das Lernen nicht nur in einem individuellen, sondern darüber hinaus in einem sozialen und kulturellen Zusammenhang. So werden durch die bewusste Rekonstruktion, Neukonstruktion und Dekonstruktion Hypothesen über die wahrgenommene Erlebniswelt aufgestellt, evaluiert und neu formuliert [Rei98; Rei06]. Der Mensch verfolgt dabei das Ziel in komplexen Situationen handlungsfähig zu sein [BP99].

Während der Behaviorismus den Menschen als weitgehend unbekannten Funktionsbaustein in einer Reiz-Reaktions-Kette betrachtet, wird die Funktionsweise dieses Bausteins durch Kognitivismus und Konstruktivismus genauer betrachtet. Beide unterscheiden sich im Lernparadigma. Der Kognitivismus sieht den Erkenntnisgewinn in der Lösung eines Informationsbedürfnisses, zum Beispiel als Reaktion auf eine reale

Problemstellung. Der Konstruktivismus jedoch versteht das aktive Auseinandersetzen und Konstruieren eines Abbildes der Erlebniswelt als eigentliches Ziel des Lernens.

2.2.3. Grundprinzipien des menschlichen Handelns

Für die Erklärung der menschlichen Handlungssteuerung werden qualitative und quantitative Modelle unterschieden. Während durch die qualitative Beschreibung das Verhalten auf Basis theoretischer Grundannahmen modelliert wird, eignen sich die quantitativen Modelle insbesondere für die Verhaltensprognose in Abhängigkeit von Entscheidungsvariablen (siehe Abschnitt 2.3.6).

Handlungen werden beim Menschen auf drei Ebenen gesteuert: *fertigkeitsbasiert*, *regelbasiert* und *wissensbasiert* [Hac73; Ras83; Rea90]. Die fertigkeitsbasierte Handlungsebene steuert das Verhalten ohne eine bewusste Regulation allein durch erlernte und automatisierte Verhaltensmuster. Dem hingegen findet auf der regelbasierten Handlungsebene eine bewusste Regulation statt. Hierbei werden erlernte und abgespeicherte Handlungsregeln auf die jeweilige Situation angewendet. In komplexen bzw. unbekannten Situationen werden die Handlungen schließlich auf der wissensbasierten Ebene reguliert. Das individuelle mentale Modell unterstützt dabei die gezielte Analyse und Planung von Handlungsabfolgen. Insbesondere in komplexen Situationen erfolgt jedoch eine zusätzliche Unterteilung der Handlungsziele in Teilziele, die sich durch direkte Handlungen erreichen lassen [Vol74].

Menschliche Handlungen sind eng mit dem Thema der *Motivation* verbunden. Bereits 1943 formulierte Maslow [Mas43] ein stark humanistisch geprägtes Erklärungsmodell für die menschliche Motivation. In diesem bilden hierarchisch strukturierte Grundbedürfnisse den eigentlichen Antrieb für Handlungen. Während in den fundamentalen Hierarchiestufen physiologische, sicherheitsbezogene, soziale und individuelle Bedürfnisse das Handeln prägen, bilden die letzten beiden Hierarchiestufen das menschliche Bedürfnis nach Selbstverwirklichung und Transzendenz ab. Je fundamentaler ein Bedürfnis ist, desto größer ist dessen Auswirkung auf das menschliche Handeln.

In seiner Übertragung der maslowschen Bedürfnistheorie auf die Arbeitswelt unterscheidet Alderfer zwischen drei Bedürfnishierarchien: *Existenzbedürfnisse* (Gesundheit, Sicherheit), *Beziehungsbedürfnisse* (Zuneigung, Zugehörigkeit, Wertschätzung) sowie *Wachstumsbedürfnisse* (Selbstverwirklichung, Produktivität) [Ald72]. Zwischen diesen Hierarchien existieren kontinuierliche Übergänge, welche in Alderfers Modell durch die zunehmende und abnehmende Dominanz einzelner Bedürfnisse erklärt werden. Kann ein Bedürfnis nicht befriedigt werden, so steigt seine Dominanz (Frustration). Wird es jedoch befriedigt, steigt die Dominanz eines höher geordneten Bedürfnisses an (Befriedigung).

Zusätzlich zur bedürfnisorientierten Handlungsregulation wird das menschliche Verhalten durch das Bestreben nach kognitiver Konsistenz geprägt. So werden Handlungen und damit Situationen bewusst vermieden, die zu einer *kognitiven Dissonanz*, also einem Widerspruch zwischen den eigenen Überzeugungen und den eigenen Handlungen, führen [Fes62]. Ist eine Vermeidung nicht möglich, ist der

2. Grundlagen und Begriffe

Mensch bestrebt die Dissonanz durch weitere Handlungen aufzuheben oder sie führt zu innerer Anspannung (Stress) und langfristig zu psychischer Überlastung und Krankheiten [Gra04].

2.2.4. Zusammenfassung

Die vorangegangenen Abschnitte haben den Zusammenhang von menschlichem Verstehen und Handeln innerhalb des Wahrnehmens, Lernens und Handelns erläutert. Hierbei wurde die Bedeutung der äußeren (Reize) sowie inneren Einflüsse (mentales Modell) auf die bewusste Handlungssteuerung des Menschen hervorgehoben. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Erkenntnisse aus den vorangegangenen Abschnitten lassen sich mit der Abbildung 2.1 vereinfacht zusammenfassen. Als Basis dient hier Rasmussens Modell der bewussten Handlungssteuerung [Ras83], welches den Zusammenhang zwischen Wahrnehmen, Lernen und bewusstem (regel- und wissensbasiertem) Handeln veranschaulicht. Dieses Modell wird in der weiteren Arbeit zur Erklärung der Wechselbeziehungen zwischen Mensch, kognitivem Informationsassistenzsystem sowie der Umwelt herangezogen.

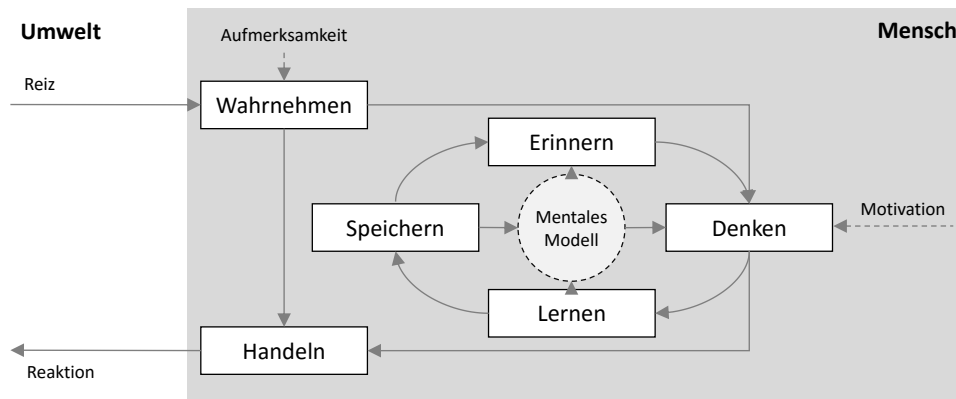


Abbildung 2.1.: Die bewusste Handlungssteuerung des Menschen nach [Ras83] beinhaltet die kognitive Verarbeitung von Reizen durch die Teilprozesse Wahrnehmen, Denken, Lernen, Speichern und Erinnern. Sie werden beeinflusst von Aspekten wie Aufmerksamkeit und Motivation sowie durch das eigene mentale Modell gesteuert.

Es zeigt sich, dass eine Information als ein Reiz in gefilterter Form die Handlungen des Menschen verursacht und gleichzeitig zur Prägung seines mentalen Modells beiträgt. Durch die Unterstützung der informationsverarbeitenden Kognitionsprozesse (Denken, Lernen, Speichern und Erinnern) kann darum Einfluss auf beide Aspekte und somit auf das Ergebnis der Kognitionsprozesse genommen werden. Diesen Zusammenhang nutzt die vorliegende Arbeit für die Unterstützung des Menschen im Arbeitsprozess. Für das weitere Verständnis sollen die informationsverarbeitenden Kognitionsprozesse als *kognitive Arbeitsprozesse* definiert werden:

Definition 2.1: *Kognitive Arbeitsprozesse* bezeichnen die zum Verstehen, Entscheiden und Planen einer Arbeitsaufgabe erforderlichen informationsverarbeitenden Kognitionsprozesse der bewussten Handlungssteuerung: Denken, Lernen, Speichern und Erinnern.

Im folgenden Abschnitt 2.3 werden nun die zuvor dargestellten psychologischen Grundlagen in eine technologische Betrachtung überführt, um somit die informationstechnische Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse zu diskutieren.

2.3. Kognitive Informationsassistentz

Psychologische Erkenntnisse werden in der Informatik für die bedarfsgerechte und individuelle Gestaltung von Technologien und Mensch-Maschine-Schnittstellen angewandt. Sie sollen darum in der vorliegenden Arbeit zur systematischen Entwicklung eines Lösungsansatzes für die kognitive Automatisierung durch Informationsassistentz am manuellen Montagearbeitsplatz eingesetzt werden. Dazu muss zunächst eine Einordnung dieses Ziels in die bisher erläuterten psychologischen Grundlagen erfolgen. Als Ausgangsbasis dafür soll der Begriff der *kognitiven Informationsassistentz* im Zusammenhang mit den kognitiven Arbeitsprozessen des Menschen definiert werden:

Definition 2.2: *Kognitive Informationsassistentz* bezeichnet im Rahmen dieser Arbeit die technologische Bereitstellung von Informationen zur Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse des Menschen. Sie unterstützt dadurch dessen Handlungsziele, um die Effizienz und Effektivität des Arbeitsprozesses und der damit verbundenen kognitiven Arbeitsprozesse zu verbessern.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich nun auf die Automatisierung der kognitiven Informationsassistentz zur Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse des Menschen im Montageprozess. Diese Form der Automatisierung wird als *kognitive Automatisierung* bezeichnet und in Abschnitt 2.3.2 näher vorgestellt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist damit die Konzeption und Entwicklung einer Technologie zur Umsetzung der kognitiven Informationsassistentz. Diese Technologie wird in der weiteren Arbeit als *Kognitives Informationsassistentzsystem* bezeichnet.

Definition 2.3: Ein *kognitives Informationsassistentzsystem* automatisiert die technologische Bereitstellung von Informationen zur Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse des Menschen. Es erfasst und interpretiert dazu die aktuelle Arbeitssituation und Handlungsziele des Menschen, schlussfolgert seinen Informationsbedarf und stellt die erforderlichen Informationen im Arbeitsprozess bereit.

Für die weitere Betrachtung von kognitiver Informationsassistentz am Arbeitsplatz ist es notwendig die bereits bekannten kognitiven Arbeitsprozesse im Zusammenhang mit dem Informationsassistentzsystem zu betrachten. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2.2 illustriert.

Das kognitive Informationsassistentzsystem stellt Informationen zur Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse des Menschen bereit und automatisiert die dazu

2. Grundlagen und Begriffe

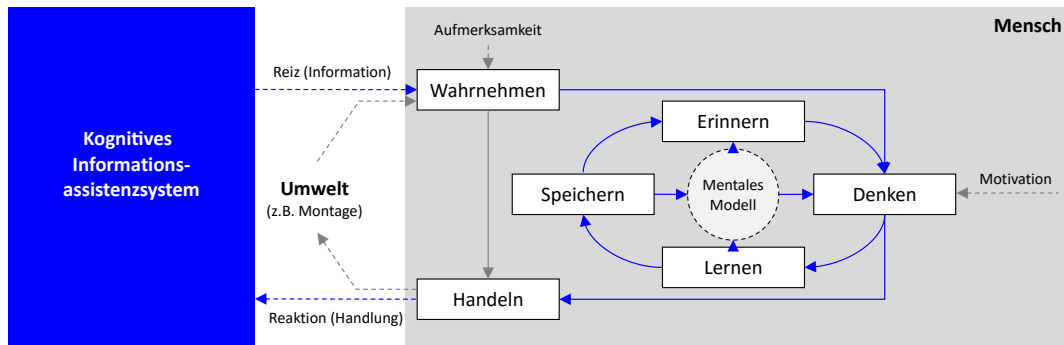


Abbildung 2.2.: Prozesse der menschlichen Kognition und Fokus der Arbeit (blau).

erforderliche technologische Informationsverarbeitung. Dazu erfasst es den aktuellen Zustand der Umwelt sowie die Handlungen des Menschen. Es bildet damit eine interaktive Schnittstelle zwischen dem Menschen und den arbeitsbezogenen Informationen. Für die Gestaltung dieser Schnittstelle gilt es methodisch und technisch die psychologischen Erkenntnisse zur menschlichen Informationsverarbeitung insbesondere im Zusammenhang mit der Ausführung von Arbeitsprozessen zu betrachten. Dazu werden im Folgenden Methoden des *Cognitive Engineering* vorgestellt, die hier ein systematisches Vorgehen ermöglichen.

Der folgende Abschnitt 2.3.1 beschäftigt sich zunächst mit der Erarbeitung eines Wissensmodells für die vorliegende Arbeit, um so den inhaltlichen und begrifflichen Unterschied zwischen Daten, Information und Wissen zu erläutern und die Zuordnung der informationstechnischen bzw. psychologischen Prozesse vorzunehmen.

2.3.1. Technische und kognitive Informationsverarbeitung

Für das weitere Verständnis der Arbeit ist die Bedeutung und Trennung der Begriffe Daten, Informationen und Wissen wichtig. Es wird darum ein Wissensmodell zur weiterführenden Erläuterung und Illustration herangezogen. Dieses ist auf die Wissenspyramide von Ackoff [Ack89] bzw. Bates [Bat05] zurückzuführen und beschreibt den wechselseitigen Zusammenhang zwischen Daten, Informationen sowie Wissen. Jennex weist in [Jen09] folgerichtig darauf hin, dass die klassische Wissenspyramide aus Sicht des organisationalen Wissensmanagements entwickelt wurde, welches sich durch eine Verjüngung von der Basis zur Spitze bemerkbar macht. Betrachtet man jedoch das individuelle Lernen, so stellt sich die Pyramide allein aufgrund der kombinatorischen Möglichkeiten auf den Kopf. In dem vorgestellten Wissensmodell wird zunächst der Datenbegriff definiert.

Definition 2.4: *Daten (D)* sind eine in ihrer Syntax definierte, zeichenbasierte Kodierung von Fakten bzw. Werten der Realität.

Hier gibt es demzufolge eine direkte Entsprechung zwischen der realen Welt und den in Daten abgebildeten Eigenschaften und Aussagen dieser. Durch die Verknüpfung

von Daten wird ihnen eine Semantik, also Bedeutung und Kontext, zugewiesen. Man spricht dann bereits von *Informationen*:

Definition 2.5: *Informationen (I) sind Daten, die durch ihre Verknüpfung untereinander eine semantische Bedeutung erhalten.*

Diese Informationen werden in eine für den Menschen geeignete und interpretierbare Form übertragen. Dadurch entsteht ein *Informationsartefakt*, welches als virtuelles oder physisches Medium die Information trägt [BK11]. Diese Trennung ist für das weitere Verständnis der Arbeit wichtig, da so eine Unterscheidung zwischen Informationsartefakten, die zum expliziten Ziel der Informationsweitergabe erzeugt und verändert werden, sowie physischen Objekten, die ebenfalls implizit Informationen enthalten, möglich ist.

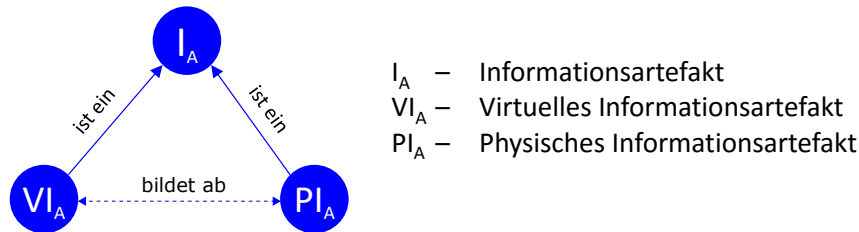


Abbildung 2.3.: Informationsartefakte sind virtuelle bzw. gegenständliche Repräsentationen von Informationen. Virtuelle Informationsartefakte können die Informationen der physischen Informationsartefakte abbilden. Die umgekehrte Abbildung ist ebenso möglich.

Definition 2.6: *Informationsartefakte (I_A) sind künstlich geschaffene Repräsentationen von Informationen in der Umwelt, die durch den Menschen oder das kognitive Informationsassistentenzsystem erfasst, verändert und interpretiert werden können. Es werden virtuelle und physische Informationsartefakte unterschieden. **Virtuelle Informationsartefakte** (VI_A) bezeichnen Informationsartefakte die durch das kognitive Informationsassistentenzsystem bereitgestellt und durch den Menschen verändert bzw. auch neu erzeugt werden können. **Physische Informationsartefakte** (PI_A) bezeichnen die bereits in der Umwelt (Montageumgebung) des Menschen befindlichen Gegenstände, welche ebenfalls Informationen enthalten, die vom Menschen und dem kognitiven Informationsassistentenzsystem erfasst, verändert und interpretiert werden können.*

Definition 2.7: *Die Menge aller Informationsartefakte I_A zu einem Zeitpunkt Z in der Umwelt von kognitivem Informationsassistentenzsystem und Mensch bezeichnet den **Informationszustand I_Z** dieser Umwelt.*

Ein auf einem Arbeitsplatzbildschirm angezeigter Montageauftrag wird daher durch die Verbindung von Information (digitaler Montageauftrag) und physischem Medium (Bildschirm) zu einem virtuellen Informationsartefakt. Ein Bauteil, dessen

2. Grundlagen und Begriffe

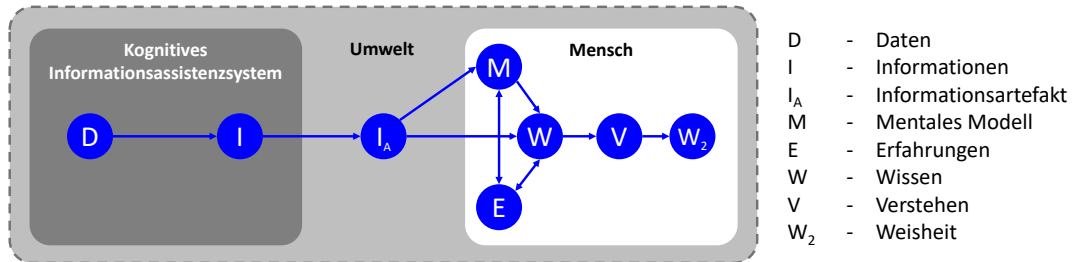


Abbildung 2.4.: Zusammenhang und Übergang von Daten, Informationen und Wissen in Anlehnung an [Ack89; Bat05; Jen09; Fri09]. In diesem Modell wird die Aneignung von Wissen und dessen Anwendung durch den Menschen betrachtet.

Beschaffenheit und Fertigungsgrad Auskunft über Eigenschaften und den aktuellen Montagefortschritt liefert, ist demzufolge ein physisches Informationsartefakt. Durch die Erfassung und Interpretation eines physischen Informationsartefaktes und die Erzeugung einer in ihrem Informationsgehalt äquivalenten Repräsentation auf Seiten des kognitiven Informationsassistenzsystems entsteht somit ein virtuelles Informationsartefakt. Umgekehrt kann durch die physische Kodierung einer Information durch das kognitive Informationsassistenzsystem wiederum ein physisches Informationsartefakt entstehen, z.B. wenn durch die automatisierte Positionierung eines Montageroboters eine Information zu seinem Bereitschaftszustand an den Werker weitergegeben wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden darum diese beiden Formen der Informationsartefakte zusammengefasst.

Wird der Weg der Informationen vom kognitiven Informationsassistenzsystem zum Menschen weiter verfolgt, erfolgt nun jede weitere Verknüpfung nicht mehr extrinsisch, z.B. durch ein technisches System, sondern intrinsisch durch den Menschen. Erst das individuelle Verknüpfen von wahrgenommenen Informationen mit den eigenen *Erfahrungen* (E) und dem mentalen Modell führt zu *Wissen* (W):

Definition 2.8: Das *mentale Modell* (M) des Menschen ist das erlernte und individuelle Verständnis von Konzepten, Zusammenhängen und Funktionsweisen der Realität.

Definition 2.9: *Wissen* (W) ist die Verknüpfung von Informationen mit persönlichen Erfahrungen und dem eigenen mentalen Modell.

Nach dem Aneignen von Informationen als Wissen erfolgt durch die aktive Auseinandersetzung mit diesem der Übergang zum *Verstehen* (V), dem bewussten Reflektieren und Bewerten von Wissen. Dem schließt sich die *Weisheit* (W₂) als eine Prediktion und Anwendung des bekannten Wissens für die eigene Situation an. Hier wird Wissen gezielt für das Treffen einer (richtigen) Entscheidung und zur Vorbereitung einer eigenen Handlung eingesetzt [Fri09].

Diese Form des Wissensmodells (siehe Abbildung 2.4) korreliert gemäß seiner informationstheoretischen Einteilung stark mit lernpsychologischen Erkenntnissen.

So lässt sich für jeden der eingeführten Begriffe eine Entsprechung in der Lernziel-Taxonomie von Bloom et al. [Blo+56] bzw. Anderson und Krathwohl [AK01] finden. Auf diesen Zusammenhang wird jedoch später in Abschnitt 4.2 näher eingegangen.

Es wird durch das beschriebene Modell deutlich, dass sich das Wissen des Menschen einerseits auf die individuellen Erfahrungen, das habituierte mentale Modell und andererseits aber auch auf die extrinsischen, angeeigneten Informationen stützt. Damit sind die kognitiven Arbeitsprozesse unmittelbar von den extern bereitgestellten Informationen abhängig. Die kognitive Automatisierung nutzt diesen Zusammenhang aus und unterstützt den Menschen bei der kognitiven Verarbeitung von Informationen. Die Grundlagen werden in den anschließenden beiden Abschnitten erörtert.

2.3.2. Konzept der kognitiven Automatisierung

Bis vor ca. 20 Jahren wurde der Begriff der *kognitiven Automatisierung* (Cognitive Automation) im psychologischen Kontext für das Anlernen und monotone Anwenden von wiederkehrenden Handlungsmustern verwendet. Durch wissenschaftliche Arbeiten zu Flugassistenzsystemen, wie zum Beispiel von Hollnagel [Hol95], Sheridan [She95] oder Thurman et al. [TBM97], wurde dieser Begriff jedoch erstmalig im Zusammenhang mit Softwaresystemen geprägt, welche in der Lage sind kognitive Aktivitäten des Menschen zu automatisieren. Bis dahin und zeitweise parallel wurde synonym der Begriff der *menschzentrierten Automatisierung* (Human-Centered Automation) verwendet [Bil91; Boy98].

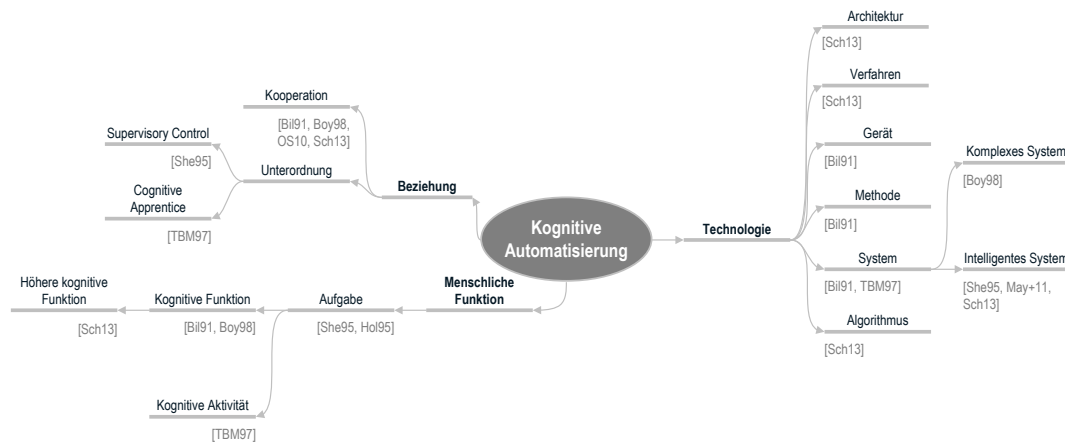


Abbildung 2.5.: Systematisierung unterschiedlicher Ansätze zur Definition der kognitiven Automatisierung

Allgemein weisen die Definitionen der beiden Begriffe kognitive sowie menschenzentrierte Automatisierung eine große Übereinstimmung auf. Sie definieren sich über die Ausprägung drei wesentlicher Aspekte: die *menschliche Funktion*, die automatisiert werden soll, die *Beziehung* zwischen Mensch und Maschine, sowie die Konkretisierung der zur Automatisierung eingesetzten *Technologie*. Diese Dreiteilung, ihre weitere

2. Grundlagen und Begriffe

Konkretisierung sowie eine Zuordnung der relevanten Quellen ist in der Abbildung 2.5 illustriert.

So ist es die *Aufgabe* [She95; Hol95] bzw. *kognitive Aktivität* [Bil91; TBM97; Boy98] eines Menschen, die durch eine Maschine ganz oder in Teilen durchgeführt wird. Schulte sieht hier sogar ausschließlich *höhere kognitive Funktionen* als Schwerpunkt der Automatisierung [Sch13]. Dabei kann die Beziehung zwischen dem Menschen und der Maschine verschiedene Modi einnehmen, wie zum Beispiel eine kooperative Aufgabenteilung [Bil91; Boy98; OS10; Sch13] oder eine Unterordnung der Maschine [She95] zum Beispiel in einer Meister-Schüler-Beziehung [TBM97] bzw. bei der Überwachung durch den Bediener (Supervisory Control) [Sch13]. Aus technologischer Sicht wird die Automatisierung durch ein *komplexes, intelligentes System* durchgeführt, das sich dabei passender Methoden, Architekturen, Verfahren und Algorithmen zum Beispiel aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz [Sch13] und teilweise durch Simulation der menschlichen Denkprozesse [May+11] bedient.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die kognitive Automatisierung jedoch begrifflich enger gefasst, um den technischen Aspekt der Prozessverteilung hervorzuheben:

Definition 2.10: Die *kognitive Automatisierung* bezeichnet ein technologisches Verfahren zur kooperativen Verteilung von kognitiven Prozessen, die zur Ausführung einer Arbeitsaufgabe notwendig sind, zwischen dem Menschen als Bediener und dem Automatisierungssystem als Assistenzsystem.

Entscheidend für das weitere Verständnis zur Form der Kooperation zwischen Bediener und Assistenzsystem ist eine vorausgehende Betrachtung zu den Zielen und Abstufungen der kognitiven Automatisierung.

2.3.3. Ziel der kognitiven Automatisierung

Durch die kognitive Automatisierung soll eine Verbesserung der Arbeitssituation für den Menschen erreicht werden. Einfache, sich wiederholende genauso wie komplexe, kognitive Aufgaben können auf diese Art und Weise vom Assistenzsystem übernommen, unterstützt und ausgeführt werden. Schulte nennt fünf kognitive Prozesse, die Ziel einer Automatisierung sind: das *Wahrnehmen* und *Verstehen* von Situationen, das *Planen* von Handlungen, das *Entscheiden* und das *Lösen von Problemen*. Er konnte in Experimenten [Sch13] nachweisen, dass sich der Einsatz kognitiver Automatisierung positiv auf die Leistungsfähigkeit des Bedieners auswirkt, zum Beispiel durch die Reduzierung der objektiven Arbeitsbelastung (Workload) und der subjektiven Beanspruchung. Zu den gleichen Schlüssen kommen Fast-Berglund et al. in ihren Studien [FB+13] über die Auswirkung kognitiver Automatisierung im Umfeld einer Produktion.

Es zeigt sich jedoch auch, dass die Automatisierung von kognitiven Prozessen gleichzeitig zu zunehmenden Fehlern und einem Verlust des individuellen *Situationsbewusstseins* (Situation Awareness) des Bedieners führen kann [Wic+10; She95]. Als Hauptursachen werden die gestiegene Komplexität der automatisierten Aufgabe

[May+11], das Nachlassen der Konzentration des Bedieners [She95] und die schwere Nachvollziehbarkeit der Aktivitäten des Assistenzsystems [Sch13] genannt. Damit wird die eigentliche Zielstellung der kognitiven Automatisierung nicht erreicht und es entsteht ein *Teufelskreis* [OS10] aus zunehmender Automatisierung und nachlassender Übersicht des Bedieners.

Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich darum mit Ansätzen zur *adaptiven Automatisierung*, welche Informationen über die aktuelle kognitive Verfassung des Bedieners bei der kooperativen Verteilung kognitiver Prozesse berücksichtigen [Sch13].

2.3.4. Grad der kognitiven Automatisierung

Ein wichtiges Ausprägungsmerkmal und Unterscheidungskriterium für Ansätze zur kognitiven Automatisierung ist der *Automatisierungsgrad* (Level of Automation). Dieser beschreibt den Umfang und die Tiefe der durch das Assistenzsystem übernommenen kognitiven Prozesse.

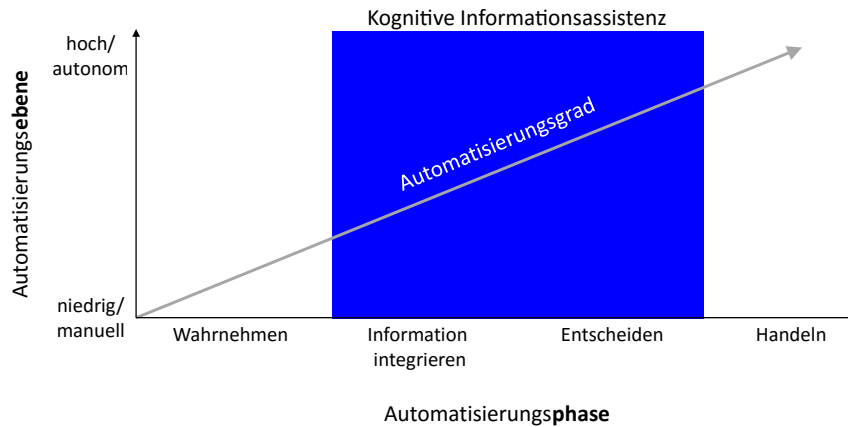


Abbildung 2.6.: Definition des Automatisierungsgrades über Automatisierungsebenen und Automatisierungsphasen (nach [Wic+10])

Wickens et al. haben hierzu unterschiedliche Einteilungen in einer Meta-Studie [Wic+10] systematisiert. Sie unterscheiden zwischen *Automatisierungsebenen* (Levels) und *Automatisierungsphasen* (Stages) (siehe Abbildung 2.6). Die Automatisierungsebenen beschreiben Abstufungen der zunehmenden Autonomie des Assistenzsystems in Anlehnung an übliche Unterteilungen, wie zum Beispiel Sheridans zehn Automatisierungsebenen [She95]. Die Phasen orientieren sich hingegen stark am menschlichen Handlungsmodell (siehe Abschnitt 2.2.3). Sie sind in vier aufeinander folgenden Aufteilungen wiederzufinden: Wahrnehmen, Informationen integrieren, Entscheiden und Handeln. Der zunehmende Automatisierungsgrad definiert sich nun durch die Zunahme der Automatisierungsebene bei gleichzeitigem Fortschritt der Automatisierungsphase.

In ihren Untersuchungen [Wic+10] konnten Wickens et al. zeigen, dass sich der Automatisierungsgrad direkt proportional auf die Leistungsfähigkeit eines Bedieners

2. Grundlagen und Begriffe

und umgekehrt proportional auf die Arbeitsbelastung bei Routinearbeiten auswirkt. Jedoch wirkt sich der Automatisierungsgrad ebenfalls umgekehrt proportional auf die Leistungsfähigkeit des Bedieners im Fehlerfall aus. Die Ursachen dafür wurden bereits im vorangegangenen Abschnitt diskutiert.

2.3.5. Anwendungsbereiche

Die kognitive Automatisierung findet in unterschiedlichen Einsatzbereichen Anwendung. Ihren Ursprung hat sie jedoch in der Überwachung sicherheitskritischer Systeme wie zum Beispiel in Kraftwerken oder in Flugzeugen. Dort hat die kontinuierliche Erforschung intelligenter Assistenzsysteme für den Piloten zu einer deutlichen Zunahme der Autonomie dieser Systeme geführt. Billings zeichnete bereits 1991 in [Bil91] die einzelnen Entwicklungsphasen der kognitiven Automatisierung im Flugzeug nach, von der gyroskopischen Stabilisierung (1890) bis hin zum Autopiloten (1980). Heute adressieren die wissenschaftlichen Arbeiten in diesem Umfeld die teilweise [Sch13] bis vollständige Autonomie [GDT13] des unbemannten Flugobjektes vom Start bis zur Landung.

Weitere Anwendungsbereiche sind in der Gebäude- bzw. Heimautomatisierung zu finden [Rut+14]. Schaefer et al. untersuchten in [Sch+14] darüber hinaus Anwendungen für kognitive Automatisierung, wie zum Beispiel Routenplanung, autonome Fahrzeuge, E-Commerce oder auch im Bereich des militärischen Einsatzes.

Ein weiterer Schwerpunkt für die Anwendung kognitiver Automatisierung ist in der Produktionsfeinsteuerung vorzufinden. Dieser wird jedoch in Abschnitt 2.4 näher erläutert.

2.3.6. Kognitive Architekturen

Für die Umsetzung der kognitiven Automatisierung in den bereits genannten Anwendungsbereichen sind nach Schulte technologische Ansätze, wie zum Beispiel *künstliche Intelligenz*, *Soft Computing*, *Machine Learning*, *Multi-Agenten-Systeme* oder *kognitive Architekturen*, von Interesse [Sch13]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen hier die kognitiven Architekturen näher betrachtet werden.

Kognitive Architekturen lassen sich auf Newells Hypothese zurückführen, dass jede künstliche Intelligenz auf einem Symbolsystem und damit verbundenen definierten Arbeitsvorschriften beruht [New80]. Nach heutigem Stand beschreibt eine kognitive Architektur die *mentale Struktur* zur Informationsverarbeitung, die *Repräsentation* und *Organisation* von Informationen innerhalb dieser Strukturen sowie die *funktionalen Verarbeitungsprozesse* zur Aneignung, Anwendung und Veränderung der Informationen [LLR08]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine kognitive Architektur darum wie folgt definiert:

Definition 2.11: Eine *kognitive Architektur* ist ein technologisches System zur Umsetzung von künstlicher Intelligenz, welches die kognitiven Strukturen und Prozesse des Menschen zum Analysieren, Entscheiden und Planen von Handlungen nachempfunden, um damit die automatisierte Lösung von Problemen zu ermöglichen.

Im Folgenden werden drei Beispiele kognitiver Architekturen vorgestellt, die in der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion wesentlich zur Übertragung psychologischer Zusammenhänge auf die Modellierung menschlicher Kognition und somit zum Verstehen von Denkprozessen und der Entwicklung künstlicher Intelligenz beitragen. Weitere Systeme werden ausführlicher in [Sch15; VMS07] vorgestellt und verglichen.

State, Operator and Result (SOAR)

Die Ursprünge von SOAR lassen sich auf Laird, Newell und Rosenbloom zurückführen. Sie beschreiben 1987 zum ersten Mal eine verallgemeinerte kognitive Architektur [LNR87], welche als technische Implementation umgesetzt wurde. Seitdem wurde diese Architektur kontinuierlich weiterentwickelt und an neue Erkenntnisse aus der Psychologie angepasst. Während dabei ursprünglich die Einfachheit und Allgemeingültigkeit im Vordergrund stand, ist SOAR heute ein komplexes Architekturmodell (siehe Abbildung 2.7), welches nicht nur unterschiedliche Lernansätze sondern genauso den Einfluss der menschlichen Vorstellungskraft oder von Emotionen auf Denk- und Entscheidungsprozesse berücksichtigt.

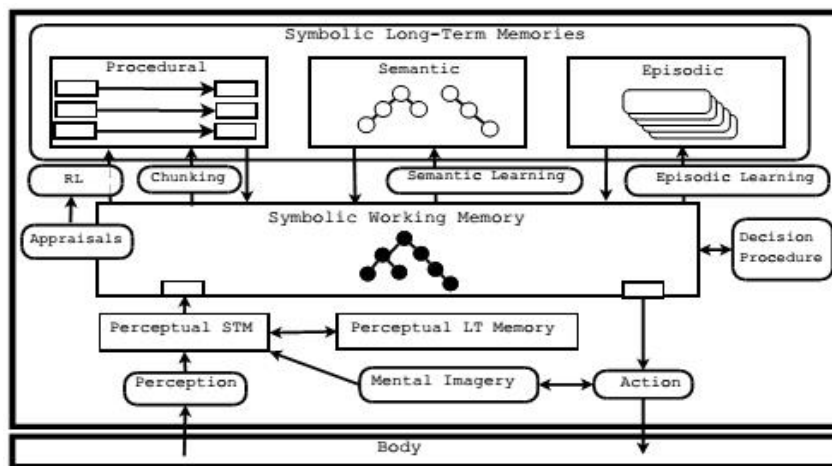


Abbildung 2.7.: Grundstrukturen von SOAR nach Laird (Quelle: [Lai12])

Nach [Lai12] werden kognitive Prozesse in SOAR auf das schrittweise Verändern von Informationen und Zuständen im Arbeits- bzw. Langzeitspeicher zurückgeführt. Dabei wird eine Ausgangssituation als ein Zustand im Arbeitsspeicher formalisiert, der durch Anwenden von Operatoren solange in einen neuen Zustand überführt wird, bis ein beabsichtigter Endzustand erreicht wird. Wenn mehr als ein oder kein Operator auf einen Zustand angewendet werden kann, wird Wissen aus einem Langzeitspeicher für das Entscheiden verwendet. Dieses wird dort durch Lernprozesse (*Chunking*) als Produktionsregeln expliziert. Das Erlernen von Regeln ist eng mit einem Verstärkersystem verbunden, welches die Regeln in Verbindung mit einem erlebten emotionalen Zustand setzt (*Reinforcement Learning*) und somit deren Bewertung im Entscheidungsprozess beeinflusst. Zusätzlich bewirkt das Lernen

2. Grundlagen und Begriffe

von Zusammenhängen (*Semantic Learning*) sowie Lernen aus Erfahrung (*Episodic Learning*) das Aneignen weiteren Kontextwissens, das zur Entscheidungsfindung beiträgt. SOAR befindet sich seit 1983 in der aktiven Entwicklung und liegt zum aktuellen Zeitpunkt in Version 9.3.2 [Lai+15] als umfangreiche Softwarebibliothek vor, die zur Modellierung und Entwicklung eigener Anwendungen mit intelligenten Verhaltensweisen verwendet werden kann.

Adaptive Control of Thought - Rationale (ACT-R)

Anderson veröffentlichte 1983 ACT als ein produktionsregelbasiertes System zur Simulation des menschlichen Verhaltens [And83]. In diesem unterscheidet er zwischen *deklarativem* und *prozeduralem Wissen* als Basis für das Denken, Lernen und Entscheiden. Das deklarative Wissen repräsentiert abstrakte Fakten (*Chunks*), welche hierarchisch organisiert sein können. Dem hingegen repräsentiert das prozedurale Wissen Ablaufpläne zur Steuerung von Aktionen. Diese sind ähnlich dem SOAR-Ansatz in Produktionsregeln mit einem Bedingungsteil und einem Aktionsteil formalisiert. Das Lernen erfolgt in ACT-R durch Bildung neuer Chunks und Produktionsregeln auf Ebene der Symbole sowie durch ihre gebrauchtsabhängige Abschwächung oder Verstärkung. Hierbei werden häufig verwendete Chunks und mit ihnen assoziierte Chunks verstärkt bzw. bei seltenem Gebrauch abgeschwächt.

Aus der Interaktion zwischen deklarativem und prozeduralem Wissen im Arbeitsgedächtnis ergibt sich schließlich die Abbildung kognitiver Prozesse. Hier weist ACT-R aufgrund seiner einfachen Struktur Vorteile in der Umsetzung gegenüber SOAR auf. Es fehlen jedoch wesentliche Aspekte, wie zum Beispiel erfahrungsbasiertes Lernen, das die Aktivierung von deklarativem bzw. prozeduralem Wissen beeinflusst.

In seinen späteren Arbeiten [And96] konnte Anderson anhand von Experimenten mit ACT-R zeigen, dass bei der Speicherung von Wissen die Verknüpfung mit zusätzlichem Kontextwissen wichtig für den späteren Abruf ist. Dort wird vorrangig Wissen aktiviert, welches für den aktuellen Kontext relevant ist.

Cortical Capacity-Constrained Concurrent Activation-based Production System (4CAPS)

Im Gegensatz zu SOAR und ACT-R weist die kognitive Architektur 4CAPS von Just und Varma [JV07] nicht nur ein symbolbasiertes Produktionsregelsystem auf sondern darüber hinaus einen sehr stark neuropsychologisch ausgerichteten Erklärungsansatz für die Ausführung kognitiver Prozesse. Demnach entsteht Denken durch die gleichzeitige Aktivität verschiedener *kortikaler Bereiche*, die in einem Netzwerk organisiert sind. Die kortikalen Bereiche sind in ihrem Funktionsumfang und in ihrer Kapazität beschränkt und werden zur Umsetzung kognitiver Prozesse synchronisiert. Dabei passt sich die Struktur des Netzwerkes den jeweiligen Anforderungen der zu erfüllenden kognitiven Aufgabe an.

Die Aktivierung von Wissen in 4CAPS bewirkt die Zuordnung zu einem kortikalen Bereich. Sie unterliegt damit den dortigen kapazitiven Beschränkungen in der Verar-

beitung. Die Aktivierung von Produktionsregeln erfolgt in festen Zyklen für jeden kortikalen Bereich getrennt. In beiden Fällen ist die Aktivierungsstärke variabel und abhängig von der kognitiven Belastung.

4CAPS liegt ähnlich SOAR und ACT-R als Softwarebibliothek in seiner letzten Version 1.2 von 2002 vor.

Zusammenfassung

In einem kognitivem Informationsassistentensystem, dem Ziel dieser Arbeit, hat die technische Informationsverarbeitung einen unmittelbaren Einfluss auf die Qualität der kognitiven Prozesse des Menschen [AU14]. Kognitive Architekturen, wie sie in diesem Abschnitt an drei Beispielen beschrieben wurden, helfen diese Prozesse zu verstehen, zu vereinfachen und für spezifische Handlungskontexte zu simulieren. Sie lassen sich somit für eine bedarfsgerechte und verständliche Interaktion zwischen dem Menschen und kognitivem Informationsassistentensystem einsetzen. Gleichzeitig automatisieren sie die Verknüpfung von Aktionssequenzen und damit von Handlungen mit erforderlichem Kontextwissen, welches *a priori* definiert wird bzw. mit Hilfe technischer Lernprozesse gesammelt, gespeichert und verfügbar gemacht wird [And96; Lai12]. Kognitive Architekturen sind daher ein geeignetes Werkzeug für die Umsetzung von situativem und personenabhängigem Systemverhalten [VMS07] in kognitiven Informationsassistentensystemen. Sie werden daher im Rahmen der Arbeit zur technologischen Untersetzung der konzeptionellen Architektur für die kognitive Automatisierung in der Montage in Kapitel 4 wieder aufgegriffen.

2.3.7. Zusammenfassung

Kognitive Informationsassistentensysteme übernehmen Aufgaben des Menschen und damit einen Teil seiner kognitiven Belastung [Sch13; Wic+10]. Sie arbeiten in Kooperation mit ihrem Bediener um so ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Abhängig vom Automatisierungsgrad unterstützen sie lediglich in der Wahrnehmung und Interpretation von Situationen. Oder sie helfen beim Planen von Arbeitsaufgaben bis hin zur eigenständigen Ausführung und Entscheidung von Prozessen. Die Gefahr besteht jedoch darin, den Menschen als Bediener nicht nur kognitive Arbeit sondern auch die Übersicht [OS10] abzunehmen und damit neue Probleme, insbesondere in Fehlerfällen zu verursachen.

Die vorliegende Arbeit hat die Entwicklung eines kognitiven Informationsassistentensystems in der Montage zum Ziel. Sie lässt sich demzufolge den Arbeiten zur kognitiven Automatisierung zuordnen und muss sich dementsprechend mit der kooperativen Verteilung von Prozessen des Denkens, Lernens, Speicherns und Erinnerns (siehe Abschnitt 2.2) beschäftigen. Dabei sind die bekannten und diskutierten Risiken zu berücksichtigen.

Im folgenden Abschnitt werden nun Konzepte aus der Anwendung der kognitiven Automatisierung in der Montage vorgestellt und diskutiert.

2.4. Kognitive Automatisierung in der Montage

In der Produktion tragen die zunehmenden Informationsmengen und die Vielfalt der Informationsinhalte zu einem kontinuierlichen Anstieg der Produktionskomplexität bei. Diese stellt hohe Ansprüche an die kognitive Leistungsfähigkeit des menschlichen Mitarbeiters und führt gleichzeitig zu erhöhten Fehlerraten [FB+13]. Um dieser Herausforderung zu begegnen lassen sich zwei Zielstellungen und damit Ansätze der kognitiven Automatisierung unterscheiden. Zum Einen der *Erhalt der Entscheidungsfähigkeit des Menschen* in der Produktion [EU04; Fas+09; EIM12; FB+13; MFBS14] und zum Anderen die *Übernahme kognitiver Aufgaben des Menschen* durch das automatisierte Produktionssystem [Zäh+07; Zae+12; May+11; May+13]. Beide Ansätze lassen sich getrennt jedoch auch in enger Verbindung miteinander betrachten. So lässt sich das Konzept der *kognitiven Fabrik* von Zäh et al. [Zäh+07] eher dem zweiten Ziel zuordnen, während der *kognitive Arbeitsplatz* eine Kombination beider Zielstellungen darstellt. Beide Kernkonzepte der kognitiven Automatisierung werden im Folgenden näher erläutert.

2.4.1. Kognitive Fabrik

Die Vollautomatisierung von Produktionsaufgaben eignet sich für die Ausführung monotoner und häufig wiederholender Handlungsmuster. In einer variantenreichen Produktion mit komplexen Produktionsvorgängen zeigt die Komplexität jedoch schnell die Grenzen der klassischen Automatisierbarkeit auf. Der Mensch ist aufgrund seiner höheren kognitiven Leistungsfähigkeit hier in der Lage auch in unvorhersehbaren Situationen adäquate Handlungsstrategien zu erarbeiten und auszuführen, während das automatisierte Produktionssystem nur den vorgeplanten Routinen folgen kann, da es aus Kostengründen für spezifische Aufgaben automatisiert wurde. Aus diesem Grund sehen Zäh et al. [Zäh+07; Zae+12] sowie Mayer [May+11; May+13] einen Lösungsansatz in der Übernahme kognitiver Fähigkeiten und damit kognitiver Arbeitsprozesse durch das Produktionssystem. Die Basis hierfür bildet das Konzept der kognitiven Fabrik [Zäh+07] in welcher über die unterschiedlichen Fertigungsstrukturen hinweg [May+13] kognitive Steuerungsinstanzen zur Planung, Beobachtung und Steuerung von Produktionsaufgaben eingesetzt werden.

Am Beispiel einer automatisierten Montageanlage entwickelten Mayer et al. [May+11] so die *Cognitive Control Unit* (CCU) zur Feinplanung und Steuerung von Montagesequenzen an einem Montageroboter. In [May+13] überträgt Mayer dieses Konzept auch auf die übergeordneten Strukturen (Zelle, Segment) der Fertigung (siehe Abbildung 2.8).

Zur technologischen Umsetzung einer kognitiven Fabrik kommen intelligente Systeme wie zum Beispiel *Multi-Agenten-Systeme* oder *Kognitive Architekturen* (siehe Abschnitt 2.3.6) in Frage.

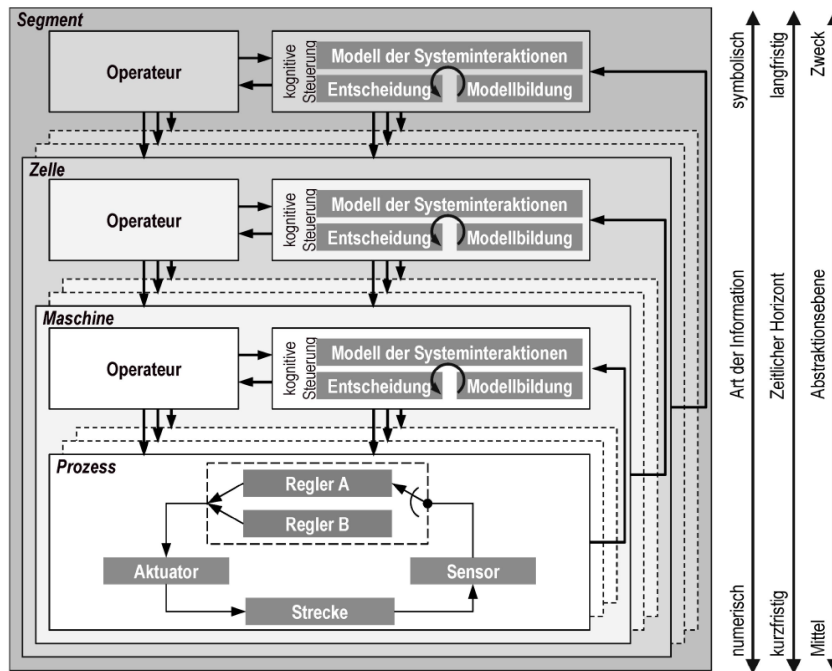


Abbildung 2.8.: Prinzip der kognitiven Steuerung in den unterschiedlichen hierarchischen Fertigungsstrukturen (Quelle [May+13])

2.4.2. Kognitiver Arbeitsplatz

Forschungen von Fast-Berglund et al. [FB+13] zu operativen Produktionsprozessen im Bereich der Montage weisen den unmittelbaren Zusammenhang zwischen der gestiegenen Produktionskomplexität und der damit einhergehenden Qualitätsreduzierung nach. Da die Produktionskomplexität aufgrund der Anforderungen des Marktes jedoch nicht reduziert werden kann, ist es notwendig den Prozess der Informationsbereitstellung umzugestalten, um durch eine Vereinfachung der Komplexität und Reduktion der kognitiven Belastung auf den Menschen dessen Leistungsfähigkeit für den Produktionsprozess zu erhalten [MFBS14]. ElMaraghy und Urbanic [EU04] haben in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen die menschlichen Fähigkeiten, Fertigkeiten und Limitierungen bereits in der Produktionsgestaltung zu berücksichtigen und auf eine angemessene Ausbalancierung insbesondere der automatisierten Prozesse zu achten. Diesem Ansatz folgen aktuelle Arbeiten [MFBS14; Kor+14; KFS15] zur kognitiven Automatisierung im Bereich der Montage. In deren Mittelpunkt steht der intelligente bzw. kognitive Arbeitsplatz (siehe Beispiele in Abbildung 2.9).

Der kognitive Arbeitsplatz zeichnet sich durch eine *Automatisierung der Informationsflüsse* zwischen der technischen Montageumgebung und dem Menschen sowie durch eine *Teilautomatisierung der Situationsbewertung und Entscheidungsfindung* (siehe Einordnung nach [Wic+10]) aus. Die physische Arbeitstätigkeit wird in diesem Konzept nach wie vor durch den Menschen ausgeführt. Aus technologischer Sicht

2. Grundlagen und Begriffe



Abbildung 2.9.: Beispiele für die kognitive Automatisierung am Montagearbeitsplatz (links Pick-By-Light-System in [FB+13], rechts In-Situ-Projektion in [Kor+13])

zeichnet sich der kognitive Arbeitsplatz durch folgende Merkmale aus, die sich direkt an die kognitiven Prozesse des Menschen zur bewussten Handlungssteuerung (siehe Abschnitt 2.2) anlehnen. Es findet insofern bereits eine kooperative Verteilung von kognitiven Arbeitsprozessen statt:

- **Wahrnehmen:** Arbeitsanweisungen werden durch ein Informationsassistenzsystem kleinschrittig, visuell und eingebettet im Arbeitsprozess bereitgestellt. Häufiger Ansatzpunkt sind *In-Situ-Projektionen* bzw. *verteilte Displaysysteme*.
- **Denken:** Die korrekte Materialentnahme, Werkzeugnutzung und teilweise auch Ausführung der Arbeitsanweisungen wird durch die *Sensorik* des Informationsassistenzsystems erfasst und kontrolliert.
- **Erinnern und Speichern:** Der Prozess der Informationsbereitstellung und Informationssammlung erfolgt vollständig automatisiert und in direkter Verbindung mit den führenden Produktionssystemen.
- **Lernen:** Das Informationsassistenzsystem ist in der Lage sich durch die Beobachtung und Bewertung der Aktivitäten des Bedieners selbst zu optimieren.

Zur Steigerung der Motivation bzw. Akzeptanz des Bedieners wurden bereits Ansätze aus dem Bereich der Spieleentwicklung adaptiert und angewendet. Ein Beispiel hierfür sind die Arbeiten zur *Gamification* von Oliver Korn [KSH12; KFS15]. Sowohl Korn als auch Mattson et al. [MFBS14] können zeigen, dass sich die kognitive Automatisierung im Bereich der Montage positiv auf die Leistungsfähigkeit des Bedieners und damit ebenso auf die Qualität des Produktes und Produktionsprozesses auswirkt.

Die bisher bekannten Lösungsansätze für den kognitiven Arbeitsplatz konzentrieren sich darauf die technischen Komponenten zur Umsetzung der kognitiven Automatisierung miteinander zu integrieren. Dafür wurde aber noch kein verallgemeinerter Entwurf zur Architektur der kognitiven Automatisierung vorgenommen. Genauso wurde die Automatisierung der Informationsflüsse zwischen dem Informationsassistentensystem und dem Werker nicht weiter thematisiert. Die bekannten Lösungen arbeiten hier mit manuell erstellten Informationsinhalten. Insofern stellt das Ziel der Arbeit, die Entwicklung eines Lösungsansatzes inklusive einer ganzheitlichen Systemarchitektur zur kognitiven Automatisierung sowie die automatisierte Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse in der Montage einen Fortschritt gegenüber dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik dar.

2.4.3. Zusammenfassung

Durch die kognitive Automatisierung als Verfahren zur Unterstützung der kognitiven Prozesse des Menschen während der Montage können die Leistungsfähigkeit des Menschen und die Qualität des Produktes erhöht werden. Erste technische Lösungsansätze konnten diesen Zusammenhang nachweisen. Dennoch ist bisher kein Ansatz zur Entwicklung einer verallgemeinerten technologischen Basisarchitektur für die kognitive Automatisierung im Bereich der Montage bekannt. Bekannte Ansätze [KFS15; MFBS14; Kor+14] untersuchten vielmehr die Effekte und konzentrierten sich weniger auf die Integration psychologischer und technischer Komponenten der kognitiven Automatisierung in einem verallgemeinerten Architekturmodell. Genauso wurde die Automatisierung der Informationsflüsse von den produktionsführenden Systemen zum Montagearbeitsplatz und zurück bisher vernachlässigt. Hier setzt jedoch die Zielstellung der vorliegenden Arbeit an.

2.5. Zusammenfassung und Bewertung

In diesem Kapitel wurde eine Einordnung des Themas der Arbeit in die beiden Disziplinen Informatik und Psychologie vorgenommen. Da die kognitive Automatisierung als Verfahren sowohl den Aspekt der menschlichen Kognition und seiner Handlungssteuerung sowie die technologische Automatisierung von kognitiver Informationsassistentz betrifft, wurde der Bezug zu für die Arbeit relevanten Forschungsergebnissen hergestellt. Dabei wurde Wert auf die Darstellung des aktuellen Forschungsstandes in dem jeweiligen Teilgebiet gelegt.

Die so gewonnenen Erkenntnisse lassen sich in den folgenden Thesen zusammenfassen:

1. Cognitive Engineering stellt das methodische Grundgerüst zur systematischen Analyse und Konzeption von kognitiven Informationsassistentensystemen zur Verfügung.

2. Grundlagen und Begriffe

2. Kognitive Informationsassistentz muss sich auf die bewusste (regel- und wissensbasierte) Handlungssteuerung des Menschen konzentrieren. Die unbewusste Handlungssteuerung ist nicht extern regulierbar.
3. Kognitive Informationsassistentz ist die technologische Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse des Menschen. Sie muss als Aspekt der kognitiven Automatisierung betrachtet werden.
4. Kognitive Architekturen sind Technologien, welche die menschlichen kognitiven Prozesse durch einen entsprechenden Systemaufbau nachempfinden.
5. Der kognitive Arbeitsplatz ist ein Konzept der kognitiven Automatisierung für die Montage. Es reduziert die kognitive Belastung des Werkers durch Umverteilung von kognitiven Arbeitsaufgaben.
6. Aktuelle Arbeiten zur kognitiven Automatisierung in der Montage lösen Teilprobleme, arbeiten jedoch mit einem manuellen Arbeitsplan. Die Automatisierung des zur kognitiven Informationsassistentz erforderlichen Informationsflusses zwischen produktionsführenden Systemen und Werker wird nicht thematisiert.
7. Eine vollständige kognitive Automatisierung in der Montage erfordert technologisch durchgängige Prozesse und eine kognitiv angemessene Methode der Informationsvermittlung im Arbeitsprozesse.

Diese Thesen werden die informationstechnische und kognitive Analyse in Kapitel 3 sowie die Konzeption in Kapitel 4 leiten.

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

In der industriellen Fertigung entfallen bis zu 40 Prozent der Kosten und sogar 70 Prozent der Produktionszeiten auf die Montage von Baugruppen und Endprodukten [LW12]. Insbesondere bei der variantenreichen Fertigung in kleinen Losgrößen ist traditionell ein großer Anteil manueller Arbeitsgänge und nur ein geringer Automatisierungsgrad vorzufinden. Die Montage von Maschinen und technischen Anlagen ist somit ein wesentlicher Bestandteil der Produktion. Durch die Montage werden einzelne Bauteile zu Baugruppen erster Ordnung (*Vormontage*), diese zu Baugruppen höherer Ordnung (*Zwischenmontage*) und anschließend zum Endprodukt (*Endmontage*) verbunden. Die VDI Richtlinie 2860:1990-05 [Ger90] unterscheidet hier zwischen primären und sekundären Montageaktivitäten. Die *primäre Montage* beinhaltet alle Fügeoperationen nach DIN 8580 [DIN03], während die *sekundäre Montage* alle zusätzlichen Hilfstätigkeiten, wie zum Beispiel das Justieren oder Handhaben der Bauteile, vereint. Die Montagearbeitsplätze können sich innerhalb einer Produktionshalle befinden oder genauso auch an entfernten Arbeitsorten sein. In beiden Fällen begegnen wir rauen und wechselnden, industriellen Arbeitsbedingungen, z.B. bezüglich der Licht-, Geräusch- oder Temperaturbedingungen.

Obwohl der Montageprozess grundsätzlich durch physische Arbeitsaktivitäten charakterisiert ist, erfordert es einen nicht zu unterschätzenden Anteil an kognitiver Arbeit für die Interpretation und das Verstehen der anstehenden Montagearbeiten durch den Montagearbeiter [FB+13; AU14]. Diese kognitiven Prozesse finden überwiegend in der Montagevorbereitung und bei der Bewertung der durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse vergleichend zur ursprünglichen Planung statt.

Es wird zunächst in Abschnitt 3.1 die Analysemethodik zur Erhebung und Auswertung von informationstechnischen und kognitiven Voraussetzungen in der manuellen Montage vorgestellt. Dem schließt sich in Abschnitt 3.2 die Darstellung der informationsverarbeitenden Systeme in der Montage als Bestandteil der Produktion an. Hierfür werden dort die informationsverarbeitenden Haupttechnologien identifiziert und in einem Schichtenmodell geordnet. Anschließend werden in Abschnitt 3.5 die kognitiven Arbeitsprozesse in der manuellen Montage erhoben und mit Hilfe der kognitiven Arbeitsanalyse systematisiert. Darauf folgt in Abschnitt 3.6 die Darstellung der Ergebnisse einer kognitiven Arbeitsanalyse der manuellen Montage.

3.1. Analysemethodik

Im Rahmen der Arbeit wurden die Montageprozesse in fünf repräsentativen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus erfasst und ausgewertet¹. Sie unterscheiden sich untereinander jeweils durch ihre Größe, ihre strategische Ausrichtung im Markt und damit durch das angebotene Produkt- und Leistungsspektrum. Diese Unternehmen stellen einen repräsentativen Querschnitt diskreter Fertigungen dar, in denen der Mensch einen nach wie vor großen Anteil in der Wertschöpfungskette einnimmt. Sie zeichnen sich insgesamt durch einen geringen bis mittleren Automatisierungsgrad bei gleichzeitig hohem Anteil an Varianten bzw. Individualprodukten aus.

- Die **Stahlbau GmbH** fertigt als Zulieferer und verlängerte Werkbank für Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus sowie für den Schiffbau standardisierte und individualisierte Metall- und Stahlkonstruktionen. Im Vordergrund stehen dabei die technischen Verfahren der Metallverarbeitung (Schneiden, Schweißen, Oberflächenverarbeitung) sowie einfache Montagetätigkeiten.
- Die **Metallbau GmbH** ist Teil eines weltweit agierenden Fertigungsverbundes, in welchem es die Prozesse der Metallverarbeitung und Montage von Gehäusekonstruktionen für komplexe Anlagen des Sondermaschinenbaus übernimmt. Außerdem werden Auftragsarbeiten von externen Kunden mit einem hohen Variantenreichtum bearbeitet. Das Produktionsspektrum reicht von Prozessen der Blechbearbeitung (Lasern, Stanzen, Biegen, Kanten, Schweißen, Lackieren, Oberflächenverarbeitung) bis zur Montage inklusive Elektromontage vollständiger Anlagengehäuse.
- Die **Aggregat GmbH** entwickelt und produziert Kältetechnikanlagen für industrielle Einsatzzwecke. Dabei wird ein hoher Variantenreichtum durch die kundenindividuellen Spezifikationen und Auslegungen der Anlagen erreicht. Zu den Produktionstätigkeiten gehören neben der Metallverarbeitung, die Montage der Kältetechnik inklusive der Elektromontage sowie die Inbetriebnahme der Aggregate nach der Endmontage.
- Die **Montage GmbH** ist auf die Montage von Kältetechnikanlagen im Schiffbau spezialisiert. Sie führt den schiffsseitigen Einbau von Klimazentralen und deren verfahrenstechnische Verbindung mit den einzelnen Schiffssektionen aus.
- Die **Portal GmbH** konstruiert und fertigt komplexe Industrieportale für die verfahrenstechnische Bearbeitung von großflächigen Metallstrukturen. Diese werden vor der Auslieferung an den Kunden am Werksstandort vollständig montiert und testweise in Betrieb genommen. Die Industrieportale sind in der Regel Einzelanfertigungen, die nach den spezifischen Kundenanforderungen ausgelegt werden.

¹Die Darstellung der einzelnen Unternehmen erfolgt auf Wunsch der Unternehmensführungen anonymisiert. Es werden die wesentlichen Charakteristika bzw. Unterscheidungsmerkmale herausgearbeitet.

In allen untersuchten Unternehmen nimmt die Montage einen großen Stellenwert im vorhandenen Produkt- und Dienstleistungsspektrum ein. Diese reicht von einfachen Montagetätigkeiten (z.B. Stahlbau GmbH) bis hin zu einer sehr komplexen sowie zeitlich und genauso räumlich aufwändigen Endmontage und Inbetriebnahme, in welcher verschiedene Fachdisziplinen zum Einsatz kommen (z.B. Aggregat GmbH, Portal GmbH). Jedes der Unternehmen verfügt über ein nach DIN EN ISO 9001:2008 zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem zur Ausführung, Veränderung und Dokumentation von Arbeitsprozessen. Dies bezieht sich insbesondere auch auf den Bereich der Produktion und damit auch auf die Montage.



Abbildung 3.1.: Arbeitsplatz in der Endmontage der Metallbau GmbH. Die Gehäuse werden vor Ort teil- bzw. endmontiert. Für die Teilmontage steht ein Arbeitstisch und für die Endmontage entsprechend Stellfläche am Arbeitsplatz zur Verfügung.

Eine Analyse der Voraussetzungen ist die Grundlage für eine später erfolgende Konzeption des kognitiven Informationsassistenzsystems zur Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse in der Montage. Dabei stehen insbesondere die informationstechnischen und individuellen Anforderungen des Montageprozesses im Fokus der Betrachtungen. Im Rahmen der Arbeit wurden die bereits vorgestellten fünf Unternehmen analysiert, um so die informationstechnischen als auch die kognitiven Rahmenbedingungen einer Montage erheben und bewerten zu können. Dazu wurde ein fünfstufiges Analysedesign angewendet:

1. **Leitfadengestütztes Interview mit der Unternehmensführung:** Die erste Stufe stützt sich auf die Durchführung eines leitfadenbasierten Interviews mit der Unternehmensführung bzw. einem Vertreter aus dem Bereich der Produktionsleitung. Hierbei wurde ein Gesamteinblick in die Arbeitsweise und Zielsetzung des Unternehmens gewonnen, während die Identifikation von Optimierungspotentialen im Bereich der Montage im Fokus stand. Durch den

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

Interviewleitfaden wurden zusätzlich weitere Aspekte wie zum Beispiel zur Unternehmenskultur und -organisation, zum Personalmanagement, möglichen Anreizsystemen für die Mitarbeiter, etc. erhoben.

2. **Besichtigung des Produktionsbereiches:** In dieser Stufe wurde der Produktionsbereich einschließlich dem Bereich der Montage besichtigt, um einen Überblick über die zu unterstützenden Arbeitsprozesse und Informationsflüsse im Zusammenspiel mit den einzelnen Fachabteilungen der Unternehmen zu erhalten. Dabei war es das Ziel, ein umfassendes Verständnis der realen Arbeitsabläufe, der verwendeten Werkzeuge, Methoden und Hilfsmittel sowie zu den Beziehungen zu anderen Fachabteilungen zu erlangen.
3. **Beobachtung und Befragung von Werkern:** Im Rahmen dieser Stufe wurden leitende und ausführende Mitarbeiter im Bereich der Montage über einen längeren Zeitraum während der Arbeit beobachtet und parallel zu ihrer Arbeitsweise und informationstechnischen Werkzeugen, Methoden und Hilfsmitteln befragt (siehe Interviewverfahren in Anhang A.1). Hier waren auch die persönlichen Eindrücke und Einstellungen gegenüber der Weitergabe von Informationen sowie zur Nutzung von Assistenztechnologien wichtig. Im Einzelnen wurden umfassende Montagearbeiten mittels des *Tracking-Verfahrens* nach Pfeiffer [Pfe09] verfolgt und analysiert.
4. **Workshop zur Entwicklung von Anwendungsszenarien:** Zur Konkretisierung und Absicherung der bis dahin durchgeführten Beobachtungen bzw. Befragungen wurden in dieser Stufe moderierte Workshops mit den leitenden und ausführenden Mitarbeitern im Bereich der Montage durchgeführt. Die Workshops folgten dabei der Methodik des *Socio-Technical Walkthrough* von Herrmann, Kunau und Loser [HKL02], um damit die mit den Arbeitsabläufen verbundenen Informationsflüsse, Verantwortlichkeiten, Werkzeuge, Informationsquellen und Störungen zu überprüfen, ergänzen und ggf. zu korrigieren. Innerhalb dieser Arbeiten wurden konkrete Anforderungen in Anwendungsfällen (Use Cases) erfasst.
5. **Kognitive Arbeits- und Aufgabenanalyse:** Als abschließende Stufe der Analyse wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Analysestufen zusammengeführt und mit Hilfe der *kognitiven Arbeitsanalyse* [RB13; Vic99; NMP06] und der *kognitiven Aufgabenanalyse* [CH13] ausgewertet. Eine Beschreibung beider Methoden des Cognitive Engineering erfolgte bereits in Abschnitt 2.1. Während dieser Analyse wurden gezielt die kognitiven Prozesse und Entscheidungen des Montaguearbeiters vor, während und nach der Ausführung seiner Arbeitstätigkeiten betrachtet.

Im Rahmen der Werkerbefragung wurden insgesamt 19 Personen im Alter von 27 bis 52 Jahren zu ihrer Einstellung gegenüber Informationsassistententechnologien am Montagearbeitsplatz befragt (siehe Abbildung 3.2). 84,2 Prozent (17 Personen)

3.2. Informationsverarbeitung in der Montage

der befragten Werker können sich dort den Einsatz von stationären bzw. mobilen Informationsassistenzsystemen vorstellen. Nur 2 Personen taten dies nicht. Nach ihren Wünschen zur Art der Informationsunterstützung befragt, antworteten die Werker:

- Fotos, Konstruktionszeichnungen und 3D-Ansichten der Konstruktionsmodelle sollten interaktiv zur Verfügung gestellt werden, um ein besseres Verständnis der Arbeitsaufgabe zu erhalten (57,1 Prozent).
- Fehler bzw. Fehlteile sollten erkannt, gekennzeichnet und dokumentiert werden (28,6 Prozent).
- Rückmeldungen der Konstruktion zu vorgeschlagenen Änderungen am Gerät sollten dokumentiert und zugreifbar sein (14,3 Prozent).

Es wurden in diesem Zusammenhang jedoch auch Bedenken geäußert. 26,3 Prozent der Werker hatten Vorbehalte gegenüber der Robustheit der einzusetzenden Gerätetechnologien (z.B. Tablets) im Zusammenhang mit den teilweise rauen und stark wechselhaften Arbeitsbedingungen der Montage GmbH bzw. der Portal GmbH. Im weiteren Interview zeigte sich, dass vor allem mobile Montageorte bzw. spezifische Fügeoperationen, wie zum Beispiel das Schweißen, zu diesen Vorbehalten führten.

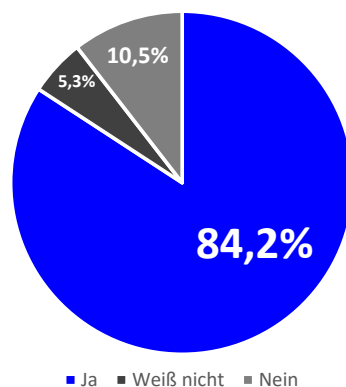


Abbildung 3.2.: Die Mehrheit (84,2 Prozent) der Werker sprach sich in einer Befragung für den Einsatz von Informationsassistenztechnologien am Arbeitsplatz aus.

Insgesamt motiviert diese positive Einstellung der Zielgruppe jedoch die weitere Analyse und Konzeption. Die Ergebnisse der informationstechnischen Analyse sowie der kognitiven Arbeits- und Aufgabenanalyse werden dazu in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.2. Informationsverarbeitung in der Montage

Kleine und mittelständische Unternehmen mit Produktionsanteil zeichnen sich mehrheitlich dadurch aus, dass sie im Gegensatz zu industriellen Großunternehmen aus

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

Gründen der Wirtschaftlichkeit keine vollständig digitalen Produktionslinien einsetzen können. Es kommen daher in vielen Fällen technologische Komponenten zum Einsatz, die kritische Aufgaben und Prozesse im Bereich der Informationsverarbeitung innerhalb der Produktion unterstützen. Insbesondere in kleinen und mittelständischen Unternehmen sind diese technologischen Infrastrukturen evolutionär gewachsen und damit nur unvollständig prozess- und datentechnisch integriert. Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Analysen bei den Unternehmen haben diese Aussage bestätigt.

Die für den Bereich der Montage relevanten Technologien zur Informationsverarbeitung werden in den folgenden Abschnitten zusammenfassend dargestellt. Für die Einordnung werden die unterschiedlichen Ebenen der Produktionsautomatisierung nach ANSI/ISA-95 [ISA10] herangezogen, die in dieser Form durch die ISO IEC 62264-1:2013 [ISO13] bzw. DIN EN 62264-1:2014-07 [DIN14] adaptiert wurde. Sie unterscheiden fünf Automatisierungsebenen und ordnen diesen den spezifischen Technologien zur automatisierten Informationsverarbeitung zu (siehe Abbildung 3.3): *Planungsebene*, *Produktionsleitebene*, *Prozessleitebene*, *Steuerungs- bzw. Feldebene* sowie die *Prozessebene*.

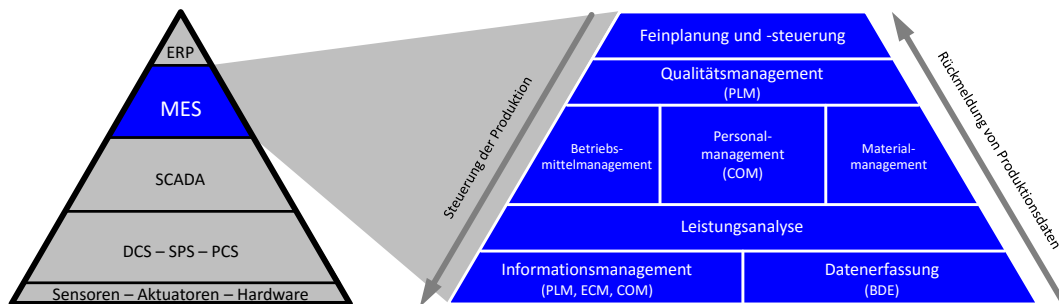


Abbildung 3.3.: Einordnung der Technologien in die Automatisierungspyramide nach ANSI/ISA-95 [ISA10] sowie Aufteilung der Produktionsleitebene in Hauptaufgaben nach VDI 5600 [VDI07]. Diese bildet den technischen Rahmen für die vorliegende Arbeit.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit lässt sich der zweiten Ebene zuordnen, der *Produktionsleitebene*, die maßgeblich zur Feinplanung- und Steuerung der Montageprozesse beiträgt. Diese Ebene wird technologisch durch Manufacturing-Execution-Systeme (MES) besetzt. Es werden im Folgenden alle Automatisierungsebenen zusammenfassend und mit ihrem Bezug zur Montage vorgestellt.

Planungsebene

Auf der obersten Ebene erfolgt die Grobplanung der Produktionsprozesse und damit der Montage. Für eine ganzheitliche und fachbereichsüberschreitende Planung werden Enterprise-Resource-Planning-Systeme (ERP) eingesetzt. Diese integrieren die Daten, Funktionen und Aufgaben einzelner Unternehmensbereiche (Administration, Controlling, Materialwirtschaft, Fertigung, Vertrieb, Rechnungswesen, Finanzwesen,

Personalwesen) in einem Informationssystem.

In der Montage kommen ERP-Systeme für die Bestandsführung, Materialbedarfsplanung, Einkaufs- und Produktionsplanung zum Einsatz. Dabei bildet der funktionale Anteil eines ERP-Systems in weitem Maße die Funktionalität eines Produktionsplanungs- und Steuerungssystems (PPS) ab. Dieses übernimmt die Grobplanung und Steuerung der Montage. Dabei werden PPS für die Bedarfsplanung, Terminplanung, Kapazitätsplanung, Auftragsfreigabe, Ablaufplanung sowie Auftragsüberwachung eingesetzt. ERP bzw. PPS optimieren Montageabläufe zum Beispiel bezüglich Termintreue, Durchlaufzeiten oder Bestandshöhen.

Produktionsleitebene

Für die Feinsteuerung der individuellen Montageprozesse werden MES eingesetzt. Sie bilden die technologische Brücke zwischen der Planungsebene der ERP/PPS-Systeme und der eigentlichen Produktionsebene. Dabei konzentriert sich das MES auf die Überwachung und Steuerung eines Fertigungsauftrages von der Einsteuerung bis zur Fertigstellung. Es übernimmt auf dieser Ebene nach VDI 5600 [VDI07] die Aufgaben des Betriebsmittelmanagements, Materialmanagements, Personalmanagements, Qualitätsmanagements, Datenerfassung, Leistungsanalyse, Feinplanung und des Informationsmanagements (siehe Abbildung 3.3).

Es werden auf der Produktionsleitebene *Betriebsdaten* innerhalb der Montage erfasst und für die Feinsteuerung verarbeitet. Betriebsdaten bezeichnen aufgezeichnete bzw. aktuelle Informationen über Zustände und Prozesse eines Unternehmens. Sie werden in *organisatorische Betriebsdaten* (Auftragsdaten, Personaldaten, Qualitätsdaten) sowie *technische Betriebsdaten* (Maschinendaten, Lager- und Materialdaten, Prozessdaten) unterteilt. Betriebsdaten werden zentral über ein ERP/PPS oder dezentral über Systeme zur *Betriebsdatenerfassung* (BDE) (z.B. Leitstände, Datenerfassungsterminals) sowie durch eine direkte *Maschinendatenerfassung* (MDE) erhoben.

Innerhalb eines MES wird der fortlaufende Montageprozess anhand von individuellen Kennzahlen (z.B. Effektivität, Qualitätsrate, Störungsgrad) nach VDMA 66412 [VDM09] analysiert und bewertet. Dadurch erfolgt ein Abgleich zwischen dem durch ERP/PPS geplanten Verlauf und dem aktuellen Stand der Montage. Ähnlich erfolgt hier die Qualitätssicherung durch eine Dokumentation von Qualitätsmerkmalen sowie die Steuerung qualitätssichernder Maßnahmen (z.B. Erstellung von Prüfprotokollen).

Zur Feinsteuerung und -planung der Montageprozesse gehört die termingerechte Einplanung, Belegung und Freigabe von Fertigungsressourcen (Werker, Material, Betriebsmittel). Durch das Informationsmanagement erfolgt die Kommunikation mit den Fertigungsressourcen teilautomatisiert. So können Maschinen direkt über ihre Maschinendatenschnittstelle angesteuert werden, während der Werker durch Informations- und Kommunikationssysteme des MES über Montageaufträge informiert wird.

In der Produktionsleitebene kommen neben MES zusätzliche informationsverarbeitende Systeme bzw. ihre Daten zum Einsatz, die jedoch teilweise mit Aufgaben und

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

Funktionen des MES verknüpft sind (siehe Abbildung 3.3). Dazu zählen:

- **Product Lifecycle Management (PLM):** Informationen aus dem Lebenszyklus eines Produktes werden durch PLM-Systeme systematisch und parallel zum Produktlebenszyklus gesammelt, bereitgestellt und verwaltet. Der Produktlebenszyklus bezieht sich dabei auf aufeinanderfolgende Phasen, die ein Produkt durchläuft: Planung, Entwicklung, Produktionsvorbereitung, Fertigung und Montage, Vertrieb und Versand, Service und Wartung, Demontage und Recycling. Durch PLM-Systeme werden alle relevanten Produktdaten und Dokumente gesammelt und zueinander in Beziehung gesetzt. Dadurch entsteht eine vertikale Integration der produktrelevanten Informationen. Wesentlicher Kern eines PLM-Systems sind Komponenten für das Produktdatenmanagement. Dieses bezeichnet Verfahren und Technologien zur Sammlung, Bereitstellung und Verwaltung von produktdefinierenden, produktrepräsentierenden sowie produktpräsentierenden Daten und Dokumenten. Diese werden zum Teil aus Fremdsystemen (CAD, ERP/PPS, MES) gewonnen und im Produktentwicklungsprozess sowie in nachgelagerten Phasen des Produktlebenszyklus, wie der Montage, zur Verfügung gestellt.
- **Enterprise Content Management (ECM):** Zur systematischen und bereichsübergreifenden Unterstützung organisatorischer Prozesse werden in Unternehmen Verfahren und Technologien für systematisches Enterprise Content Management eingesetzt. Diese unterstützen die Erfassung, Verwaltung, Speicherung, Archivierung und Bereitstellung von unternehmensweit relevanten Informationen auf der Basis strukturierter und unstrukturierter Daten.
- **Kommunikation (COM):** Für die Kommunikation zwischen Beteiligten im Montageprozess werden Werkzeuge zur synchronen (Mobilfunk, Messenger) und asynchronen Kommunikation (E-Mail, Fax, SMS) eingesetzt.

Die Verknüpfung der Daten aus diesen informationsverarbeitenden Systemen mit der Montage erfolgt überwiegend durch Komponenten des MES. So wird zum Beispiel das Bereitstellen von Dokumenten aus PLM und ECM innerhalb des Informationsmanagements bzw. des Qualitätsmanagements realisiert.

Prozessleitebene

Für die Überwachung, Visualisierung und Steuerung technischer Prozesse der Montage kommen in automatisierten bzw. teilautomatisierten Fertigungsbereichen SCADA-Systeme (Supervisory Control and Data Acquisition) zum Einsatz. Sie überwachen in Echtzeit gemessene Betriebsdaten, stellen diese dar und ermöglichen neben einer manuellen Steuerung über Fernbedienungsterminals oder speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) eine automatische Regelung der technischen Prozesse über Discrete Control Systems (DCS) bzw. Process Control Systems (PCS). Der Datentransport von Datenpunkten eines SCADA-Systems zum überwachenden MES erfolgt überwiegend

3.3. Bereitstellung von montagerelevanten Informationen

auf der Basis von TCP-basierten Techniken, Feldbussystemen oder seriellen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen.

Steuerungs- bzw. Feldebene

Auf dieser Ebene befindet sich die Hardware der automatisierten Montagesysteme (z.B. kooperativer Montageroboter). Hier werden im laufenden Prozess Daten über *Sensoren* erfasst bzw. es werden die *Aktuatoren* der Montagesysteme angesteuert.

Prozessebene bzw. Shop Floor

Die verfahrenstechnische Ausführung der Montageprozesse erfolgt auf dieser Ebene.

3.3. Bereitstellung von montagerelevanten Informationen

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die informationsverarbeitenden Technologien, die einen Bezug zur Montage aufweisen, vorgestellt. Hierbei wurde auf die enge Verknüpfung zwischen den funktionalen Komponenten auf der Produktionsleitebene und den angegliederten Informationsverarbeitungssystemen, wie zum Beispiel PLM bzw. ECM, hingewiesen. Während der Montage ist diese Verknüpfung essentiell, da so montagerelevante Informationen zur Anleitung des Werkers am Arbeitsplatz bereitgestellt werden.

In diesem Abschnitt sollen die erforderlichen Prozesse zur Erstellung der am Montagearbeitsplatz erforderlichen Informationen erläutert werden. Die Ausgangsbasis dafür ist ein vereinfachtes Modell (siehe Abbildung 3.4) der Informationsverarbeitungsprozesse, die zur Entwicklung eines neuen Produktes und damit zur Erstellung der montagerelevanten Informationen in einem Produktionsunternehmen notwendig sind. Das Modell verallgemeinert hierbei die prinzipiellen Prozesse, die in den untersuchten Unternehmen überwiegend manuell und nur mit geringer automatisierter Unterstützung während der Produktionsplanung ausgeführt werden.

Im Modell wird zwischen den *Informationen* (weiß), die in einem Informationsverarbeitungssystem gespeichert bzw. verarbeitet werden, und den manuellen *Arbeitsprozessen* (schwarz), die zur Erstellung dieser Informationen führen, unterschieden.

Im Folgenden werden die manuellen Prozesse zur Erstellung der montagerelevanten Informationen zusammenfassend und mit Fokus auf den generellen Ablauf der Prozesse erläutert:

- **Technische Auslegung:** Im Rahmen der technischen Auslegung werden die *Kundenanforderungen* analysiert, um Produktmerkmale und Konfigurationen zur Erfüllung der Anforderungen des Kunden abzuleiten. Diese werden mit dem bereits vorhandenen Produkt- und Artikelstamm verglichen, um eine *Spezifikation* der verfahrenstechnischen und technologischen Basiskomponenten (z.B. Auslegung und Identifikation der Bauteile/Artikel) zu erstellen.

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

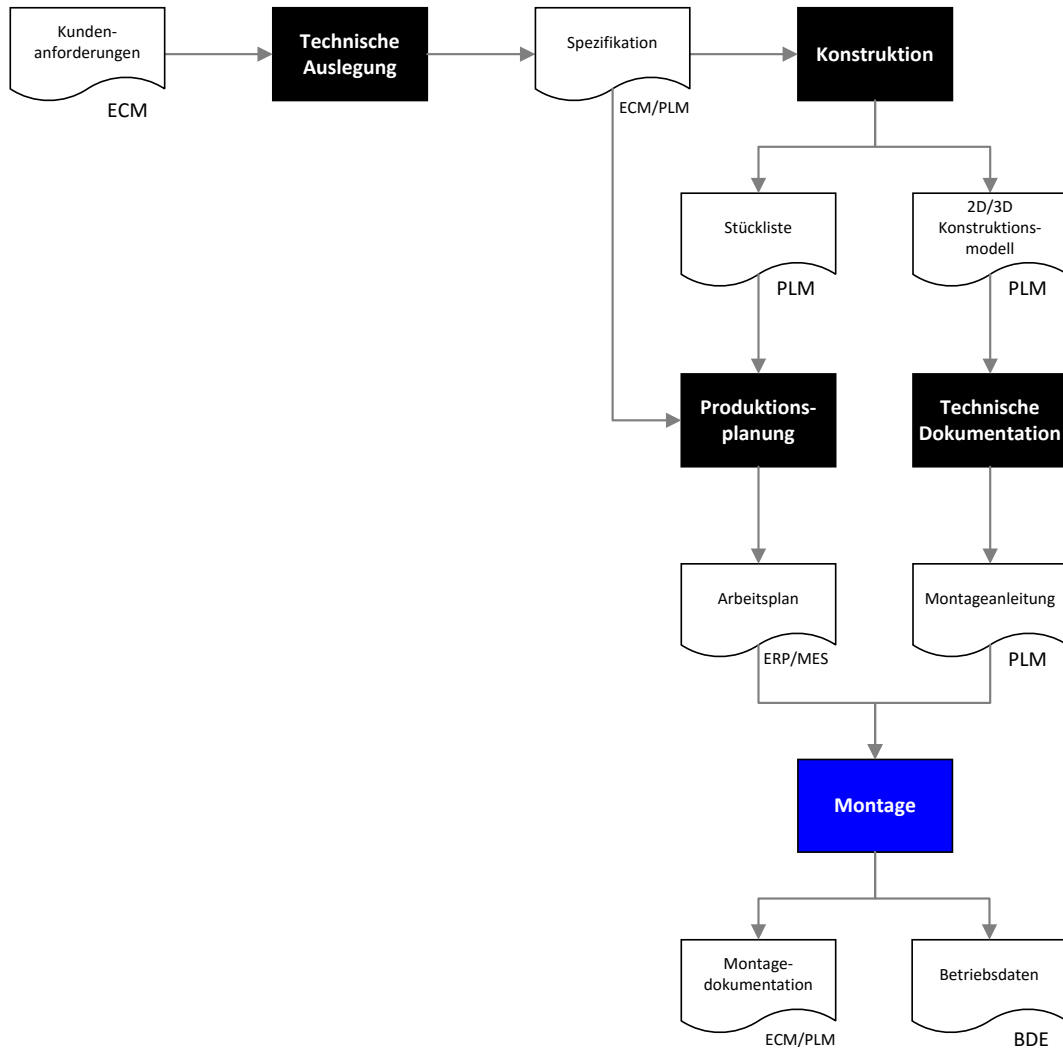


Abbildung 3.4.: Manuelle Prozesse zur Erstellung der montagerelevanten Informationen

3.3. Bereitstellung von montagerelevanten Informationen

- **Konstruktion:** Während der Konstruktion wird mit den Vorgaben der *Spezifikation* und dem Hintergrundwissen des Konstrukteurs ein Modell des zu fertigenden Produktes entwickelt. Dieses Modell muss die verfahrenstechnischen und technologischen Vorgaben der Spezifikation einhalten und basiert in der Regel (außer bei vollständigen Neuentwicklungen) auf dem bereits vorhandenen Produktportfolio. Als Ergebnis der Konstruktion entsteht einerseits ein *2D/3D-Konstruktionsmodell*, welches den strukturellen, geometrischen und technischen Aufbau des Produktes festlegt, und andererseits eine Stückliste der verwendeten Bauteile und Materialien.
- **Technische Dokumentation:** Durch die technische Dokumentation wird eine in einzelne Arbeitsschritte unterteilte *Montageanleitung*² für den Werker entwickelt, welche die sequentielle Montage in entscheidenden Handlungsabschnitten beschreibt. Dazu werden Teil des *2D/3D-Konstruktionsmodells* zum Beispiel als Explosionszeichnung für die Illustration und Konkretisierung der Arbeitsschritte verwendet und um spezifische Vorgaben, Hinweise und Prüfschritte ergänzt.
- **Produktionsplanung:** In der Arbeitsvorbereitung werden innerhalb der Produktionsplanung die *Spezifikation* und die *Stückliste* zur Erstellung eines Arbeitsplanes verwendet. Der Arbeitsplan unterteilt den Fertigungs- und damit auch den Montageprozess in abgeschlossene Arbeitsgänge, die mit unterschiedlichen Ressourcen (Werker, Maschinen) sowie Artikeln aus der Stückliste belegt werden.
- **Montage:** Durch die Einsteuerung des *Arbeitsplanes* in die Produktion werden die Arbeitsgänge zur Montage an die Werker verteilt. Sie erhalten damit einen terminierten Arbeitsauftrag innerhalb dessen Ausführung die *Montageanleitung* zur fachgerechten Ausführung der Arbeitsgänge verwendet wird. Die Verknüpfung zwischen der Montageanleitung und dem Arbeitsplan erfolgt hierbei explizit über die Struktur und Bezeichnungen bzw. implizit über verfahrenstechnische Teilaufgaben der Montage (z.B. Elektromontage). Parallel zum Fortschritt der Montage werden die Arbeitsgänge in einer *Montagedokumentation* als Durchlaufprotokoll zur Qualitätssicherung protokolliert und es werden *Betriebsdaten* (z.B. Zeiten, Gutteile, Fehlteile, Störungen) erfasst.

Das vorgestellte Modell konzentriert sich auf die Fachabteilungen *Vertrieb*, *Entwicklung* mit ihren Bereichen Konstruktion sowie Technische Dokumentation und auf die *Produktion*. Es lässt dabei bewusst die informationstechnischen Beziehungen zu anderen Fachabteilungen unbetrachtet, wie zum Beispiel dem Einkauf zur Bereitstellung von Lieferinformationen, da diese innerhalb der Montage keinen direkten Einfluss ausüben. Sie sind dann durch die Grobplanung im ERP (Beschaffung der Artikel) bzw. die Feinsteuerung im MES (Ausfall einer Lieferung) abgebildet.

²Ein Beispiel für eine Montageanleitung kann dem Anhang [A.2](#) entnommen werden.

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

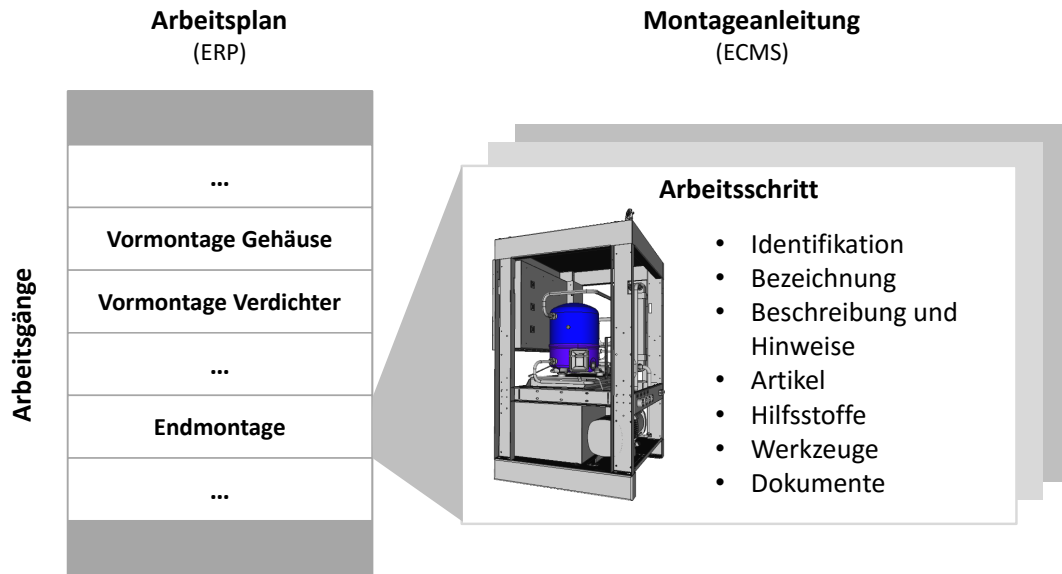


Abbildung 3.5.: Zusammenhang zwischen Arbeitsplan, Arbeitsgängen und Montageanleitung

In der Analyse des Modells zeigt sich, dass ein Großteil des Handlungswissens des Werkers für die Montage aus der Montageanleitung gewonnen wird. Sie konkretisiert die innerhalb eines Arbeitsganges auszuführenden Arbeitsschritte (siehe Abbildung 3.5). Damit stellt sie die entscheidenden Informationen zur produktspezifischen Ausführung der bekannten Montageoperationen bereit. Ein Beispiel für eine Montageanleitung kann dem Anhang A.2 entnommen werden. Die einzelnen Arbeitsschritte werden darin durch eine Kombination aus textuellen Arbeitsanweisungen, Prozessfotos, 2D-Zeichnungen und einer Listung der zu verwendenden Werkzeuge, Artikel und Hilfsstoffe beschrieben.

Die Montageanleitung vermittelt dem Werker somit Wissen über *Fakten* (Was?), *Methoden* (Wie?) sowie *Zusammenhänge* (Warum?), die zum Verstehen und Planen der auszuführenden Arbeitsschritte erforderlich sind [AB15b]. Dieses Handlungswissen wird durch das individuelle Erfahrungswissen des Werkers ergänzt, welches zum Beispiel erlernte und optimierte Vorgehensweisen zur Ausführung einzelner Arbeitsschritte beinhaltet.

Zum Lösungsansatz der vorliegenden Arbeit gehört es, das montagerelevante Handlungswissen, welches in Montageanleitungen abgebildet ist, in einer automatisierten Form zu verarbeiten und situationsangepasst bereitzustellen (siehe Kapitel 4), um so die kognitiven Arbeitsprozesse des Werkers während der Montage zu unterstützen. Damit wird auch der Prozess der technischen Dokumentation berührt und teilautomatisiert. Im folgenden Abschnitt wird auf Basis der bisherigen informationstechnischen Betrachtungen ein erstes Modell zur Einbettung eines Informationsassistentensystems in die Montage vorgestellt.

3.4. Informationstechnische Einbettung eines kognitiven Informationsassistenzsystems in der Montage

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die unterschiedlichen Technologien (siehe Abschnitt 3.2) sowie Prozesse (siehe Abschnitt 3.3) zur Informationsbereitstellung in der Montage erläutert. Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu konzipierende kognitive Informationsassistenzsystem für den Werker muss sich hier in die Produktionsleitebene einordnen und den Informationsfluss von den produktionsführenden Systemen zum Werker und zurück automatisieren. Dadurch hat es gleichzeitig Verknüpfungspunkte zu ERP, MES, PLM, ECMS sowie BDE. Diese werden in einem Modell in Abbildung 3.6 dargestellt.

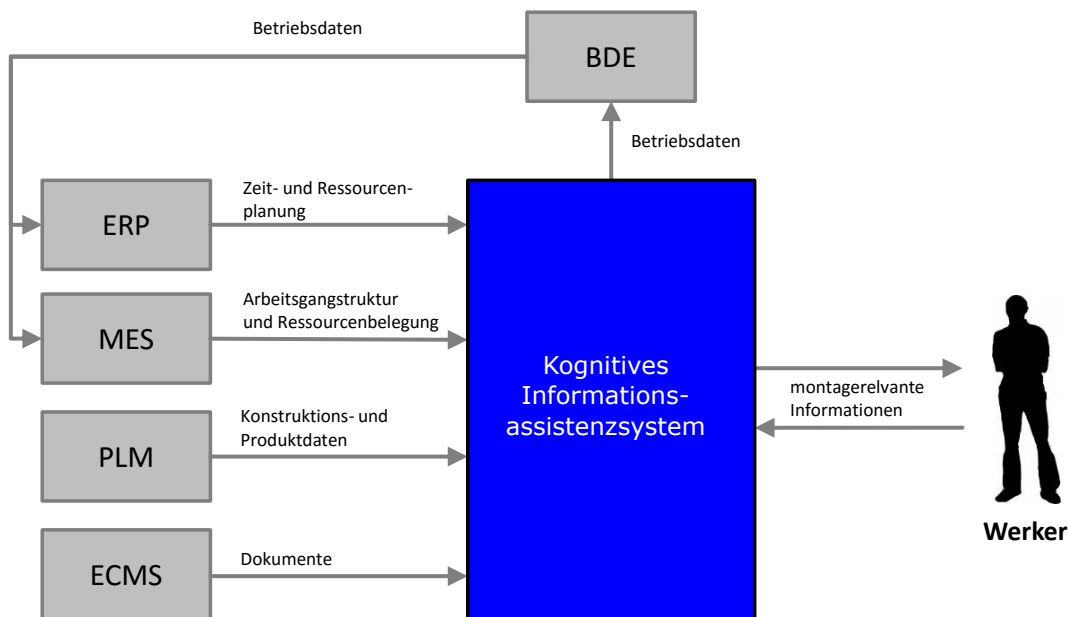


Abbildung 3.6.: Die informationstechnische Einbettung des kognitiven Informationsassistenzsystems in die bestehende Infrastruktur erfolgt über eine Kopplung an die Systeme ERP, MES, PLM, ECMS und BDE.

In dem Modell wird der Daten- bzw. Informationsaustausch zwischen den gekoppelten Systemen, dem kognitiven Informationsassistenzsystem sowie dem Werker ersichtlich. Das kognitive Informationsassistenzsystem muss hier die unterschiedlichen Daten und Informationen zusammenführen, um so den Werker innerhalb seines Montageprozesses die aktuell montagerlevanten Informationen automatisiert zu Verfügung zu stellen und Informationen über den laufenden Montageprozess zu sammeln. Eine technologische Konzeption und Konkretisierung dieses Modells der informationstechnischen Einbettung erfolgt in den Abschnitten 4.3.3, 4.3.1 sowie 4.3.

Bisher erfolgte eine ausführliche Analyse der informationstechnischen Ausgangssituation in der Montage mit Blick auf die beteiligten informationsverarbeitenden

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

Technologien und Prozesse. Im folgenden Abschnitt wird nun die Seite des Werkers näher betrachtet. Darum wird in den folgenden beiden Abschnitten eine Analyse des Wirkungsumfeldes in der manuellen Montage sowie der Montageaufgaben durchgeführt.

3.5. Kognitive Arbeitsanalyse der Montage

In Abschnitt 2.1 wurde die kognitive Arbeitsanalyse als Methode des Cognitive Engineering zur schrittweisen Analyse der Arbeitsdomäne, Arbeitsaufgaben, Strategien, sozialen Organisation sowie Kompetenzen des Arbeitenden vorgestellt [RB13].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit bildet die kognitive Arbeitsanalyse das Gerüst für die kognitive Analyse der Arbeitsdomäne und damit des direkten Wirkungsumfeldes der manuellen Montage. Methodisch strukturiert sie das Wirkungsumfeld in fünf Abstraktionsebenen. Beginnend mit der obersten Abstraktionsebene, der Definition des Arbeitszieles, benennt und konkretisiert jede weitere folgende Ebene die funktionalen Komponenten zur Erfüllung des Arbeitszieles.

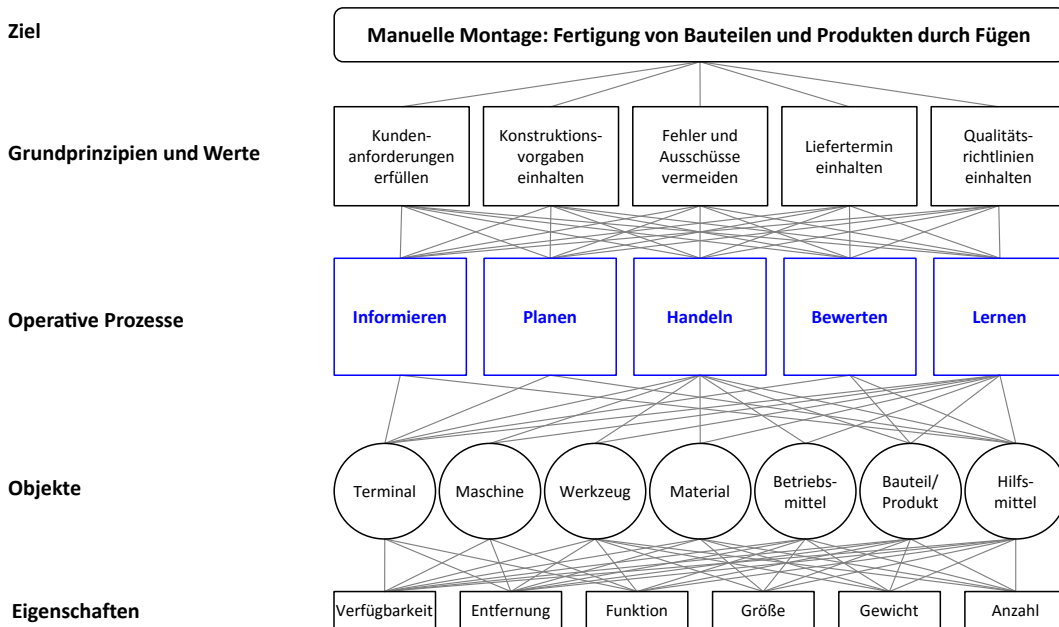


Abbildung 3.7.: Durch die kognitive Arbeitsanalyse wird das Wirkungsumfeld der manuellen Montage in Analyseebenen zerlegt, auf welchen die einzelnen Entitäten näher untersucht werden. Die Zerlegung und Analyse im Rahmen dieser Arbeit erfolgte dabei nach der methodischen Vorgehensweise von [RB13].

In Abbildung 3.7 wird das unmittelbare Wirkungsumfeld der manuellen Montage illustriert. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Ebenen und die Analyseergebnisse dazu näher erläutert.

Ebene 1: Ziel

Das Ziel ist der manuellen Montage ist die verfahrenstechnische Fertigung von Bauteilen und Produkten durch Fügeoperationen.

Ebene 2: Grundprinzipien und Werte

Die Analyse des Wirkungsumfeldes bildet eine Abstraktionshierarchie, auf deren zweiter Ebene die Zerlegung des Arbeitszieles in Grundprinzipien und Werte erfolgt. Diese benennen wichtige Einschränkungen und Werte, welche für die Erreichung des Arbeitszieles wesentlich sind:

- **Kundenanforderungen erfüllen:** Bauteile und Produkte werden entsprechend der spezifischen Kundenanforderungen ausgelegt und individualisiert. Darum nimmt die Einhaltung dieser Anforderungen einen großen Stellenwert bei der Montage ein. Bauteile und Produkte, welche diese Anforderungen nicht erfüllen, werden nicht abgenommen sondern beanstandet und führen zu Mehrarbeit und Zusatzkosten.
- **Konstruktionsvorgaben einhalten:** Die technische Auslegung eines Bauteiles bzw. Produktes wird durch die Konstruktion vorgegeben. Abweichungen führen zu funktionalen und damit zu qualitativen Mängeln am Arbeitsergebnis. Darum sind die Konstruktionsvorgaben für die Durchführung der manuellen Montage handlungsführend.
- **Fehler und Ausschüsse vermeiden:** Die Ausführung einer komplexen Montage erfordert Konzentration und Gewissenhaftigkeit vom Werker. Fehler in der Montage führen zu Qualitätseinbußen, Mehrarbeit und Zusatzkosten. Fehler können genauso auch zu unnötigen Materialausschüssen führen, welche allein aus ökonomischen und ökologischen Gründen zu vermeiden sind.
- **Liefertermin einhalten:** Die Liefertreue bei der Montage eines Bauteils bzw. Produktes insbesondere in komplexen Liefer- und Produktionsketten ist für den Kunden entscheidend bei zukünftigen Aufträgen. Darum sind die Liefertermine nicht zu überschreiten.
- **Qualitätsrichtlinien einhalten:** Die verfahrens- und prozesstechnische Qualität der Montagedurchführung sichert die Qualität und damit erfolgreiche Abnahme des Produktes. Richtlinien zur Einhaltung und Beurteilung der Qualität sind aus diesem Grund zu berücksichtigen und einzuhalten.

Die genannten Grundprinzipien schränken den Handlungs- und Entscheidungsspielraum des Werkers bei der manuellen Montage ein. Sie geben jedoch auch die zu berücksichtigenden Werte für das Wirkungsumfeld vor und erleichtern damit das Treffen von Entscheidungen insbesondere in neuen oder komplexen Situationen. Gegebenenfalls können die Grundprinzipien und Werte priorisiert werden, um eine zusätzliche Handlungssicherheit zu erreichen.

Ebene 3: Operative Prozesse

Die dritte Ebene benennt und konkretisiert die operativen Prozesse, die zur Erreichung des Arbeitszieles durchgeführt werden. In Abbildung 3.7 wurde zunächst eine stark verallgemeinerte Kategorisierung dieser Prozesse vorgenommen, um die Komplexität des Gesamtmodells nicht unnötig zu erhöhen. Es lassen sich so fünf Prozesskategorien ableiten, die nun ausführlicher erläutert werden.

Informieren In dieser Kategorie sind alle Prozesse zur Informationsbeschaffung während der manuellen Montage enthalten. Im Fokus stehen für den Werker dabei der Arbeitsgegenstand selbst, der Arbeitsprozess und die Arbeitsumgebung. Die Informationsbeschaffung dient dabei einerseits zur Erhaltung des situativen Bewusstseins über Veränderungen im Arbeitsumfeld, die sich auf das eigene Handeln auswirken. So kann der Werker adäquat darauf reagieren. Andererseits ist sie die Grundlage für ein strukturiertes und planvolles Handeln des Werkers insbesondere in komplexen Montagesituationen.

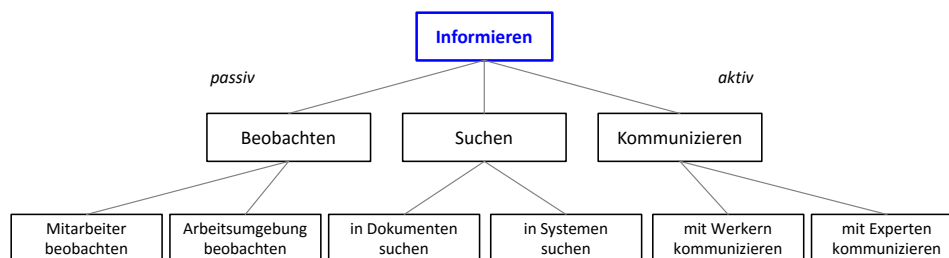


Abbildung 3.8.: Es lassen sich drei Prozesse der Informationsbeschaffung unterscheiden: Beobachten, Suchen und Kommunizieren.

Der Werker informiert sich während der Montage durch drei verschiedene Prozesse (siehe Abbildung 3.8). Durch das *Beobachten* der Arbeitsumgebung sowie von Mitarbeitern erlangt er Informationen über seine aktuelle Arbeitssituation sowie die Situation der anderen. Daran richtet er sein weiteres Planen und Handeln aus. Durch das bedarfsorientierte *Suchen* nach Informationen in am Arbeitsplatz verfügbaren Informationsquellen, wie zum Beispiel Dokumenten oder Informationssystemen, eignet sich der Werker selbstbestimmt Informationen an. Dies geschieht genauso durch das *Kommunizieren* mit anderen Werkern oder Experten.

Während das Beobachten eine passive Informationsaneignung darstellt, nimmt der Werker beim Suchen und Kommunizieren eine aktive und selbstorganisierte Rolle ein.

Planen Diese Kategorie enthält die kognitiven Prozesse zur aktiven Planung der Montageaktivitäten. Dazu zählt die Auswahl des nächsten Fertigungsauftrages genauso wie die Selbstorganisation der einzelnen Aktivität. Maßgeblich für die Qualität der Planungsprozesse ist die Aktualität und Verfügbarkeit von relevanten

Informationen. Diese unterstützen das Entscheiden und Strukturieren des eigenen Handelns.

Handeln In dieser Kategorie werden alle physischen Arbeitsprozesse der manuellen Montage zusammengefasst. Sie lassen sich entsprechend ihrer Ablaufart in *Haupttätigkeiten* (planmäßig, unmittelbar), *Nebentätigkeiten* (planmäßig, unmittelbar) und *zusätzliche Tätigkeiten* (unplanmäßig, unbestimmt) aufteilen [DB12].

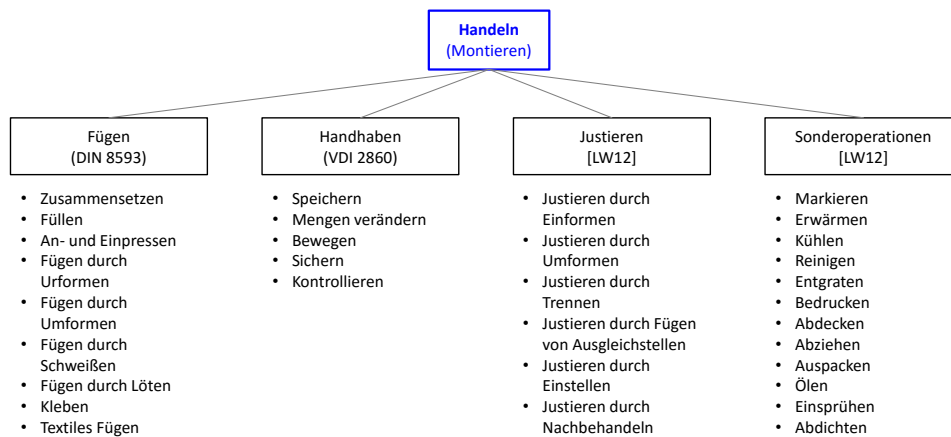


Abbildung 3.9.: Die physischen Prozesse der manuellen Montage unterteilen sich in Fügen, Handhaben, Justieren und Sonderoperationen (in Anlehnung an [LW12; DIN03; Ger90])

Die physischen Arbeitsprozesse unterteilen sich so weiter in die Tätigkeiten Fügen, Handhaben, Justieren und Sonderoperationen (siehe Abbildung 3.9). Das *Fügen* umfasst dabei alle Haupttätigkeiten der Montage zum dauerhaften Verbinden von Bauteilen zu einer Einheit [DIN03]. Fügeoperationen sind zum Beispiel Zusammensetzen, Kleben, Löten oder Schweißen. Das *Handhaben* ist eine Nebentätigkeit und Teilfunktion des Materialflusses. Es beschreibt das Erhalten, Schaffen bzw. Verändern der räumlichen Ordnung von Bauteilen in ihrem Bezugssystem [Ger90]. Hierzu zählen das Bewegen, Sichern oder das Kontrollieren von Bauteilen. Eine weitere Nebentätigkeit ist das *Justieren*. Darunter ist das Herstellen der erforderlicher Funktion, Genauigkeit oder Eigenschaften von Bauteilen zu verstehen. Als zusätzliche Tätigkeiten bzw. *Sonderoperationen* werden alle weiteren Tätigkeiten bezeichnet, die prozesstechnisch zur Durchführung der Montage erforderlich sind und in Abhängigkeit zu den Haupt- und Nebentätigkeiten stehen. Beispiele sind das Markieren oder Entgraten von Bauteilen, das Instandhalten von Werkzeugen und Maschinen oder das Auspacken von Material.

Bewerten Diese Kategorie enthält alle kognitiven Prozesse zur Bewertung und Reflektion des eigenen Handelns und der Veränderungen in der Arbeitsumgebung.

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

Hierzu zählen das Einordnen, Vergleichen, Analysieren oder Interpretieren der Montagesituation in Abhängigkeit von Bekanntem oder dem eigenen Erfahrungsschatz.

Lernen In dieser Kategorie werden alle kognitiven Lernprozesse im Zusammenhang mit dem Arbeitsprozess zusammengefasst. Hier lassen sich nach Eraut [Era11] drei Prozessarten unterscheiden. Lernen als *Nebenprodukt des Arbeitsprozesses* beinhaltet alle Lerntätigkeiten des Werkers, die innerhalb des eigentlichen Arbeitsprozesses, also hier während der Montage erfolgen. Dazu zählen zum Beispiel gruppendynamische Prozesse, die Konsultation von Experten oder das eigenständige Problemlösen. Das Lernen kann auch *getrennt vom Arbeitsprozess* erfolgen. Beispiele hierfür sind das Mentoring, Coaching oder Shadowing. Dazwischen befinden sich weitere Formen des informellen Lernens, so zum Beispiel das Lernen durch Beschaffen von Informationen, Beobachten, Reflektieren oder Fragestellen.

Ebene 4: Objekte

Auf der vierten Abstraktionsebene der Analyse des Wirkungsumfeldes werden die physischen Objekte der Arbeitsumgebung unterteilt, die zur Erreichung des Arbeitszieles eingesetzt werden können. In der manuellen Montage sind das die Maschinen und Werkzeuge, Bauteile und Materialien, Betriebs- oder Hilfsmittel sowie die zur Verfügung stehenden Terminals zur Informationsbeschaffung oder Betriebsdatenerfassung. Abhängig von der Art der durchzuführenden Haupt-, Neben- oder zusätzlichen Tätigkeit sind unterschiedliche Objekte für deren Ausführung notwendig. Hier besteht also wiederum eine direkte Beziehung zwischen der Prozess- und der Objektebene in der Abstraktionshierarchie.

Ebene 6: Eigenschaften

Auf der fünften Ebene sind die Eigenschaften der Objekte benannt, die zur Erreichung des Arbeitszieles relevant sind. Dies sind zum Beispiel die Verfügbarkeit und Funktion der Objekte, ihre Entfernung zum Werker oder auch ihre Größe und das Gewicht.

3.6. Kognitive Aufgabenanalyse der Montage

Zur weiteren Analyse wird die kognitive Aufgabenanalyse verwendet, welche in Abschnitt 2.1 eingeführt wurde. Das Ziel dieser Methode des Cognitive Engineering ist die tiefergehende Begutachtung der kognitiven Prozesse, Herausforderungen und Anforderungen an den Menschen in komplexen Arbeitssituationen [CH13]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit liegt der Analysefokus auf den entsprechenden kognitiven Prozessen während der Durchführung der manuellen Montage durch den Werker. Die methodische Analysebasis stellen die Verfahren zur Dokumentation und Begutachtung der kognitiven Entscheidungsprozesse nach [Vic99; RPG94] bereit. Hierbei wird der komplexe Wahrnehmungs-, Interpretations-, Analyse- und Planungsprozess in seine

3.6. Kognitive Aufgabenanalyse der Montage

basalen Schritte zur Analyse der Ausgangssituation sowie zur Entscheidung und Planung einer Handlungsstrategie zerlegt.

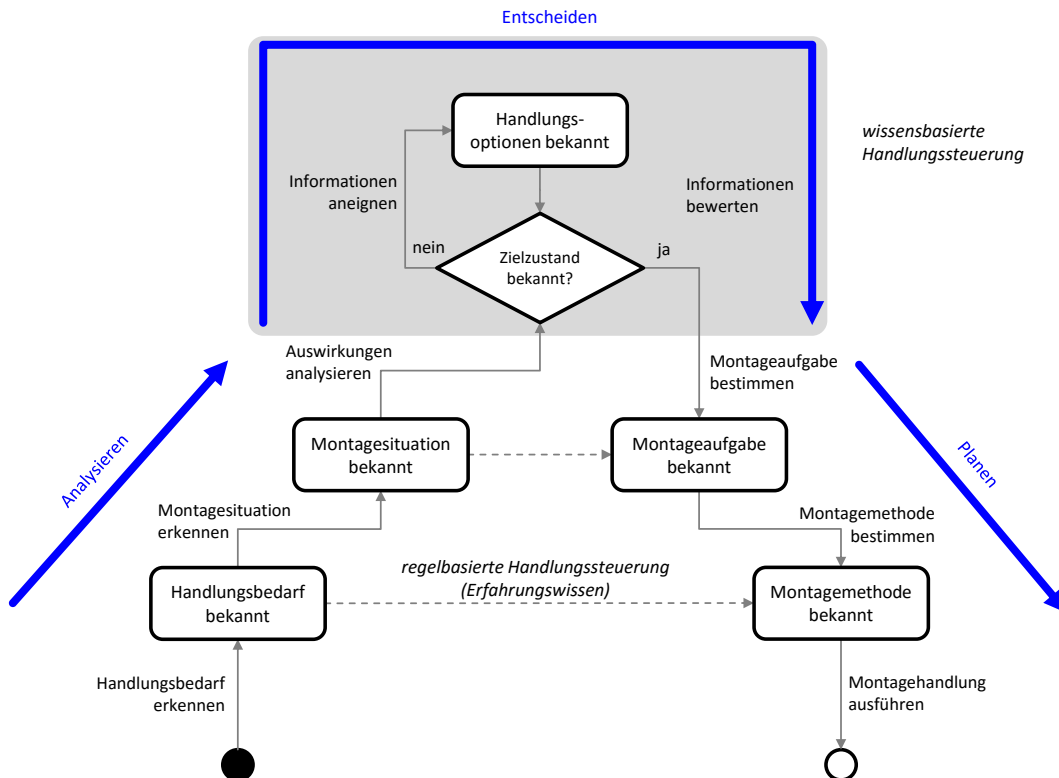


Abbildung 3.10.: Entscheidungsleiter zur regelbasierten und wissensbasierten Handlungssteuerung während der manuellen Montage in Anlehnung an das Entscheidungsleitermodell von [Vic99]. Zustände sind hier entsprechend der UML-2.0-Modellierung als Rechteck dargestellt während die Prozesse als Zustandsübergänge und damit als Kanten modelliert werden.

Abbildung 3.10 veranschaulicht so die unterschiedlichen Schritte während der kognitiven Bewertung einer aktuellen Montagesituation und der daraus resultierenden Planung von Arbeitshandlungen. Die Schritte sind als Übergänge zwischen Zuständen modelliert. Es konnten im Rahmen der Analyse acht Schritte identifiziert werden:

1. **Handlungsbedarf erkennen:** Zunächst verschafft sich der Werker einen Überblick über das zu montierende Bauteil. Dies ist ein Prozess der Informationsbeschaffung, in dem der Zielzustand und die dafür erforderlichen Teilstände identifiziert und analysiert werden. Ergibt sich aus dieser ersten Analyse ein Handlungsbedarf wird die Analyse im nächsten Schritt vertieft.
2. **Montagesituation erkennen:** In diesem Schritt analysiert der Werker die Gesamtheit der Montagesituation, also auch den aktuellen Zustand der Arbeit-

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

sumgebung. Es wird so zum Beispiel die Verfügbarkeit erforderlicher Werkzeuge, Materialien und Hilfsmittel geprüft. Das Erkennen von Störungen im geplanten Ablauf erfolgt ebenso hier.

3. **Auswirkungen analysieren:** Der Werker analysiert nun die Auswirkungen der aktuellen Montagesituation auf den weiteren Montageablauf. Er bewertet den Montagefortschritt gegenüber seiner Planung sowie den Umfang und die Konsequenzen von aufgetretenen Störungen, um einen nächsten Zielzustand für seine Handlungen zu bestimmen.
4. **Informationen aneignen:** Ist der Zielzustand zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt, muss sich der Werker in dem nächsten Schritt Informationen zum Zielzustand und daraus folgenden Handlungsoptionen aneignen.
5. **Informationen bewerten:** Bieten sich dem Werker unterschiedliche Handlungsoptionen an oder zeichnet sich die aktuelle Situation durch einen hohen Unsicherheitsgrad aus, wird der Werker seine ihm möglichen Optionen und die damit verbundenen Handlungsziele eingehend bewerten. Diese Bewertung erfolgt iterativ. Jede Option wird einzeln bzw. im Vergleich zu den Alternativen analysiert. Es folgt jeweils die Analyse der damit verbundenen Auswirkungen.
6. **Montageaufgabe bestimmen:** Ist der nächste Zielzustand für die Montage identifiziert, steht damit das folgende Handlungsziel fest und der Werker beginnt die Handlungsstrategie auszuarbeiten. Dazu bestimmt er zunächst die mit dem neuen Zielzustand verbundene Montageaufgabe.
7. **Montagemethode bestimmen:** In diesem Schritt wählt der Werker die zur Durchführung der Montageaufgabe geeignete Montagemethode aus.
8. **Montagehandlung ausführen:** Abschließend führt der Werker die ausgewählte Montagemethode aus. Ein Zyklus ist damit beendet und ein neuer beginnt.

In diesem Modell zur Handlungssteuerung während der manuellen Montage können durchaus erlernte bzw. habituierte Abkürzungen zwischen einzelnen Schritten den Entscheidungsprozess beschleunigen. So kann Erfahrungswissen durchaus zum direkten Ausführen einer Montagemethode nach Identifikation des Handlungsbedarfs oder der aktuellen Montagesituation führen. Dieses Wissen ist in Form von Handlungsregeln präsent und wird musterartig angewendet.

Umso tiefer der Montagearbeiter jedoch in den Bewertungs- und Analyseprozess einsteigt, umso stärker muss er abstrahieren und auf Basis seines vorhandenen Wissens entscheiden. Diese wissensbasierte Handlungssteuerung ist zeitaufwändig und geprägt durch den intensiven Umgang mit Informationen und damit mit Wissen.

3.7. Zusammenfassung und Bewertung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde eine informationstechnische und kognitive Analyse der Montage durchgeführt, um so die relevanten informationsverarbeitenden

Technologien, Prozesse der Informationsbereitstellung sowie der kognitiven Arbeit am Montagearbeitsplatz zu identifizieren und zu systematisieren. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Analyse lassen sich somit als Thesen für die vorliegende Arbeit formulieren:

1. Die kognitive Informationsassistentz als Unterstützung für den manuellen Arbeitsprozess der Montage ist der Produktionsleitebene zuzuordnen. Sie ist dort eine Erweiterung der bestehenden MES-Funktionalitäten Datenerfassung, Leistungsanalyse, Informationsmanagement, Feinplanung und -steuerung sowie Qualitätsmanagement.
2. Die kognitive Informationsassistentz automatisiert den Prozess der Bereitstellung von montagerelevanten Informationen in den Teilschritten der Produktionsplanung und der technischen Dokumentation.
3. Die kognitive Informationsassistentz unterstützt die regel- und wissensbasierte Handlungssteuerung des Werkers während der Ausführung eines Arbeitsganges und damit die operativen Prozesse Informieren, Planen, Handeln, Bewerten und Lernen.
4. Die kognitive Informationsassistentz vermittelt dem Werker das zur Ausführung eines Arbeitsganges erforderliche Handlungswissen durch die Verknüpfung und Bereitstellung von Fakten, Methoden und Zusammenhängen.

Die Erhebung der kognitiven Arbeitsprozesse in der Montage hat zu den fünf operativen Prozessen Informieren, Planen, Handeln, Bewerten und Lernen geführt. Diesen liegt die wissensbasierte Handlungssteuerung zugrunde und damit die Teilprozesse Wahrnehmen, Denken, Speichern, Lernen und Erinnern. Sie sind das Ziel der Unterstützung durch ein kognitives Informationsassistentzsystem für den Bereich der manuellen Montage, und damit das Ziel dieser Arbeit. Die kognitive Aufgabenanalyse hat hier in der tiefergehenden Betrachtung ein mehrstufiges Entscheidungsmodell ergeben, welches zur regel- und wissensbasierten Handlungssteuerung der Montage-tätigkeiten angewendet wird. Die unterschiedlichen Entscheidungsschritte dieses Modells sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch das zu konzipierende kognitive Informationsassistentzsystem zu unterstützen.

Bezogen auf das Ziel der kognitiven Informationsassistentz in der Montage werden durch die technische Unterstützung des Menschen Zeiten für die Suche und Verarbeitung von montagerelevanten Informationen reduziert, informations- bzw. interpretationsbedingte Fehler vermieden und manuelle Erstellungsprozesse für Montageanleitungen automatisiert.

Aus den Ergebnissen der Analyse wurden in diesem Kapitel drei Modelle entwickelt, die als Grundlage für die weitere methodische und technische Konzeption im folgenden Kapitel eingesetzt werden:

- Das **Modell zur informationstechnischen Einbettung** eines kognitiven Informationsassistentzsystems (siehe Abbildung 3.6) wird in Abschnitt 4.3.3 zur

3. Informationstechnische und kognitive Analyse der Montage

Modellierung des Montagewissens sowie in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3 zur Entwicklung und Konkretisierung eines Architekturmodell für die kognitive Automatisierung weiterverwendet.

- Das **Modell des Wirkungsumfeldes** der Montage (siehe Abschnitt 3.5) wird ebenfalls zur Modellierung des Montagewissens in Abschnitt 4.3.3 herangezogen, da in diesem der Zusammenhang zwischen den Zielen, operativen Prozessen und den physischen Objekten bzw. ihren Eigenschaften abgebildet wird.
- Das **Entscheidungsleitermodell** zur bewussten Handlungssteuerung in der Montage (siehe Abbildung 3.10) wird im Rahmen der Entwicklung eines integrierten Prozessmodells in Abschnitt 4.1 und zur Diskussion um die Methodik der kognitiven Automatisierung in Abschnitt 4.2 verwendet.

Damit werden die analytischen Ergebnisse im Rahmen der vorliegenden Arbeit sowohl für die Konzeption und Integration der technologischen Komponenten der kognitiven Informationsassistentz von Bedeutung.

4. Kognitive Informationsassistenz in der Montage

Die vorliegende Arbeit hat die systematische Erarbeitung eines kognitiven Informationsassistenzsystems für die Automatisierung der Informationsflüsse und die kognitive Unterstützung des Werkers in der manuellen Montage zum Ziel. In der Zusammenarbeit zwischen Werker und kognitiven Informationsassistenzsystem erweist sich der automatisierte Informationsprozess als Schnittstelle zwischen beiden. Durch diesen werden der menschliche Kognitionsprozess sowie die Handlungssteuerung (siehe Abschnitt 2.2) beeinflusst. Aus diesem Grund wird die kognitive Informationsassistenz in Verknüpfung mit den bereits vorgestellten psychologischen Erklärungsmodellen konzeptionell diskutiert.

In diesem Kapitel werden daher die vorangegangenen theoretischen Betrachtungen zu den Grundlagen und Begriffen aus Kapitel 2 und die Ergebnisse der informationstechnischen und kognitiven Analyse der Montage aus Kapitel 3 aufgegriffen und im Rahmen der Konzeption in Modelle für die Aspekte der kognitiven Informationsassistenz in der Montage überführt.

Das Konzept der kognitiven Informationsassistenz und damit die konzeptionelle Betrachtung der vorliegenden Arbeit wird auf drei aufeinander aufbauende Aspekte begründet:

- **Prozesse:** Die konzeptionelle Verknüpfung der *Informationsprozesse* des kognitiven Informationsassistenzsystems mit den *Kognitionsprozessen* sowie den *Arbeitsprozessen* des Menschen führt in Abschnitt 4.1 zu einem *Prozessmodell der kognitiven Informationsassistenz*. Es werden die Wechselwirkungen und Verknüpfungspunkte der Prozesse aus systemtheoretischer Sicht betrachtet. Diese bilden die Grundlage für die weitere methodische und technologische Konzeption der kognitiven Informationsassistenz.
- **Methodik:** Die kognitive Informationsassistenz basiert auf einer effizienten Zusammenarbeit zwischen dem Menschen und dem kognitiven Informationsassistenzsystem. Es werden in Abschnitt 4.2 die methodischen Ansätze zur Verteilung der kognitiven Arbeitsprozesse durch *Team Cognition* sowie *Cognitive Apprenticeship* als Basismodelle der Zusammenarbeit diskutiert. Dazu wird der Ansatz eines *digitalen mentalen Modells* entwickelt.
- **Technologie:** Die technologischen Umsetzung der kognitiven Informationsassistenz erfordert die Auseinandersetzung mit den dazu erforderlichen Basiskomponenten. In Abschnitt 4.3 wird darum zunächst ein allgemeines *Architekturmodell*

4. Kognitive Informationsassistenten in der Montage

entwickelt, welches anschließend schrittweise verfeinert und am Beispiel *kognitiver Architekturen* für die kognitive Informationsassistenten in der manuellen Montage konkretisiert wird.

Als Basismodell für die nun folgenden Betrachtungen wird ein systemtheoretischer Ansatz gewählt, welcher das kognitive Informationsassistentensystem und den Menschen als Systeme in Wechselbeziehung zueinander sowie mit ihrer Umwelt, der Montageumgebung, betrachtet. Dieser Zusammenhang wird durch die Abbildung 4.1 vereinfacht illustriert. Es werden hier noch nicht die inneren Komponenten und Prozesse der beiden Einzelsysteme betrachtet.

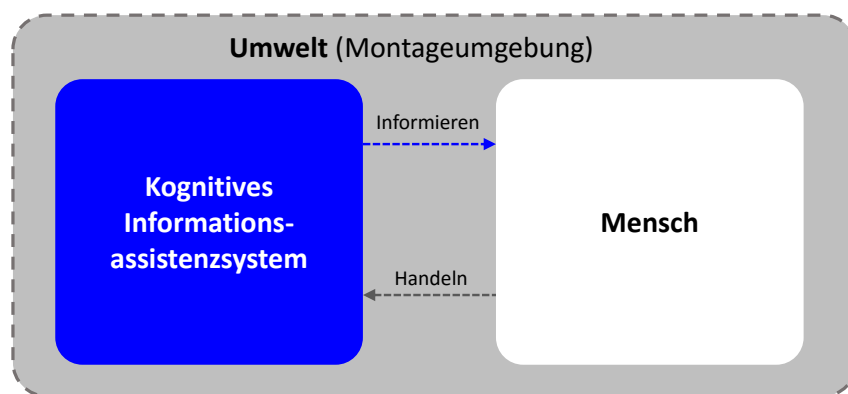


Abbildung 4.1.: Das kognitive Informationsassistentensystem ist eingebettet in die Montageumgebung als äußere Umwelt, in der sich auch der Mensch befindet. Eine Interaktion erfolgt ausschließlich über Veränderungen der Umwelt.

Sowohl das kognitive Informationsassistentensystem als auch der Mensch sind eingebettet in die Umwelt. Im Fall der manuellen Montage handelt es sich hierbei um die Arbeitsumgebung, in der die Montageprozesse ausgeführt werden. Das kognitive Informationsassistentensystem und der Mensch interagieren mit der Umwelt und bewirken durch Veränderungen in dieser einen Reiz bzw. ein Signal, welches durch beide interpretiert wird und zu einer Reaktion führt. Die psychologischen Grundlagen auf der menschlichen Seite wurden hierzu bereits in Abschnitt 2.2 zusammenfassend vorgestellt. Die Funktionsweise und Aspekte auf der Seite des kognitiven Informationsassistentensystems werden nun betrachtet. Der folgende Abschnitt fokussiert sich darauf auf eine konzeptionelle Beschreibung der relevanten Prozesse sowie der Wechselwirkungen der beiden Systeme kognitives Informationsassistentensystem und Mensch. Dadurch wird das bisher abstrakte Bild vom kognitiven Informationsassistentensystem schrittweise verfeinert und konkretisiert.

4.1. Prozess der kognitiven Informationsassistentz

Bereits in Abschnitt 2.3.2 wurde das Prinzip der kognitiven Automatisierung zur operativen Unterstützung des Menschen im Arbeitsprozess vorgestellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird im Gegensatz zu anderen Arbeiten (z.B. [May+11; May+13]) der Fokus jedoch in der Unterstützung kognitiver Prozesse und nicht in der Automatisierung dieser gesehen. Aus diesem Grund wird die *kognitive Informationsassistentz* als ein Weg der kognitiven Automatisierung betrachtet. Ziel ist es hierbei die informationsbedingte Komplexität des Arbeitsprozesses [EIM12; FB+13] zu reduzieren und dadurch den Verlust der Informationsübersicht [Wic+10] und somit der Entscheidungsfähigkeit zu vermeiden.

Im folgenden Abschnitt wird die enge Verknüpfung von Informations-, Kognitions- und Arbeitsprozessen thematisiert, bevor daraus ein konzeptionelles Basismodell für die kognitive Informationsassistentz entwickelt wird.

4.1.1. Informations-, Kognitions- und Arbeitsprozesse

Ein effektiver *Arbeitsprozess* erfordert zunächst die erfolgreiche Aneignung, Verarbeitung und Anwendung von aufgabenbezogenem Wissen durch den Menschen [Era11; Lin+10; KB00]. Durch eine steigende Variantenvielfalt, wie zum Beispiel im Fall einer Montage, unterliegen die den Aufgaben zugrundeliegenden Informationen stetigen Veränderungen. Diese führen wiederum zu der Herausforderung, neue oder aktualisierte Informationen zeitnah sowie aufgabenbezogen dem Werker zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig darf die Menge und Variabilität der bereitgestellten Informationen den Werker in seiner Wahrnehmung sowie in der weiteren kognitiven Verarbeitung nicht zu Widersprüchen führen oder sogar überfordern, da ansonsten Fehler in ihrer Interpretation oder Anwendung entstehen [RV64; RPG94].

Der *Informationsprozess* wirkt sich damit unmittelbar auf den *Kognitionsprozess* und den daraus resultierenden physischen *Arbeitsprozess* aus, bzw. auf dessen Ergebnisse [AU14]. Die Fehler beim Verstehen und Interpretieren einer Information führen in der Konsequenz zu Fehlern in der Ausführung informationsbasierter Handlungen. Der Zusammenhang dieser drei Prozesse wird in Abbildung 4.2 illustriert. Er basiert auf den vorausgegangenen Betrachtungen in Abschnitt 2.3.1.

Der Informationsprozess erfasst den aktuellen Informationszustand I_Z der Montageumgebung und bildet diesen in maschinell-interpretierbare Daten (D) ab, um relevante Informationen für den Menschen bereitzustellen. Dadurch wird wiederum der Informationszustand der Montageumgebung verändert, der durch den Kognitionsprozess des Menschen erfasst und mit dem Ziel der Aneignung sowie Anwendung von Wissen (W) im Arbeitsprozess interpretiert wird. Die Handlungen des Menschen auf Basis dieses Wissens verändern schließlich erneut den Informationszustand der Montageumgebung.

Zum besseren Verständnis werden im Folgenden diese drei wesentlichen, konzeptionellen Teilprozesse, die in ihrer Verkettung den Übergang von digitalen Daten auf Informationen und schließlich Wissen und Verstehen des Werkers abbilden, erläutert.

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

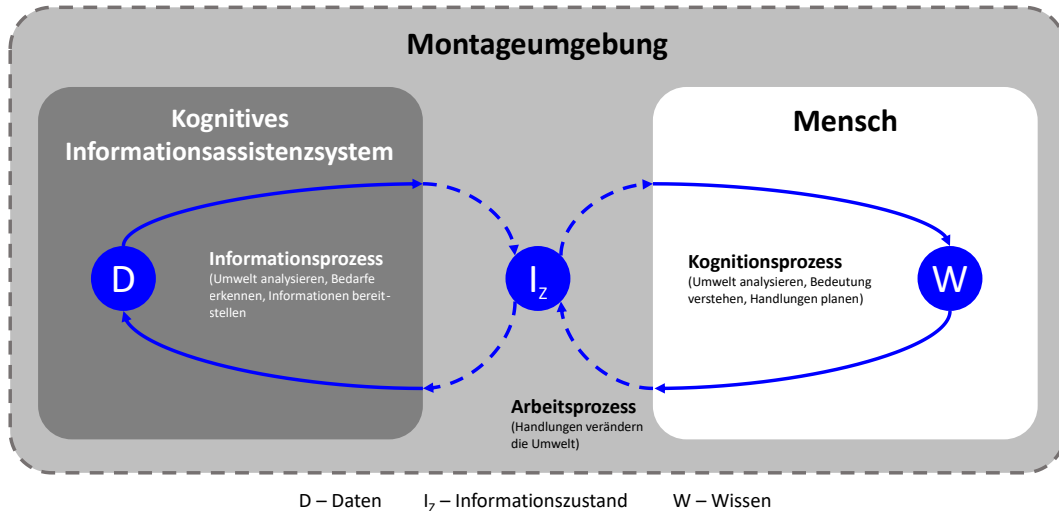


Abbildung 4.2.: Vereinfachte Darstellung des Zusammenhangs zwischen Informationsprozess, Kognitions- und Arbeitsprozess

Informationsprozess

Zunächst wird der Informationsprozess vorgestellt. Hierbei handelt es sich um die wesentlichen daten- und informationsverarbeitenden Prozessschritte zur Bereitstellung von Informationen für den Menschen im Arbeitsprozess sowie für die Gewinnung von Informationen aus diesem.

Der Informationsprozess übernimmt den bidirektionalen Transfer zwischen Daten und Informationen. In Abbildung 4.3 ist dieser Zusammenhang schematisch dargestellt. Zu den Prozessschritten zählen:

- **Erfassung:** Den Ausgangspunkt des Informationsprozesses bildet die Erfassung des aktuellen Informationszustandes der Umwelt. Über Sensoren werden so relevante Informationen über den Zustand der Arbeitsumgebung, die Tätigkeit des Werkers sowie zum Fortschritt des Arbeitsprozesses erhoben. Dazu wird der Informationszustand der virtuellen und physischen Informationsartefakte erfasst.
- **Interpretation:** In einem mehrstufigen Teilprozess werden die erhobenen Informationen über den Zustand der Umwelt mit vorhandenem Hintergrundwissen interpretiert. Jede Interpretationsstufe erzielt dabei eine semantisch abstraktere Aussage über diesen Zustand. So kann zum Beispiel eine allgemeine Arbeitssituation oder ein Informationsbedarf aus den erhobenen Informationen abgeleitet werden
- **Entscheidung:** Aus der Bewertung der aktuellen Arbeitssituation bzw. des Informationsbedarfs folgt eine Entscheidung über eine mögliche Intervention

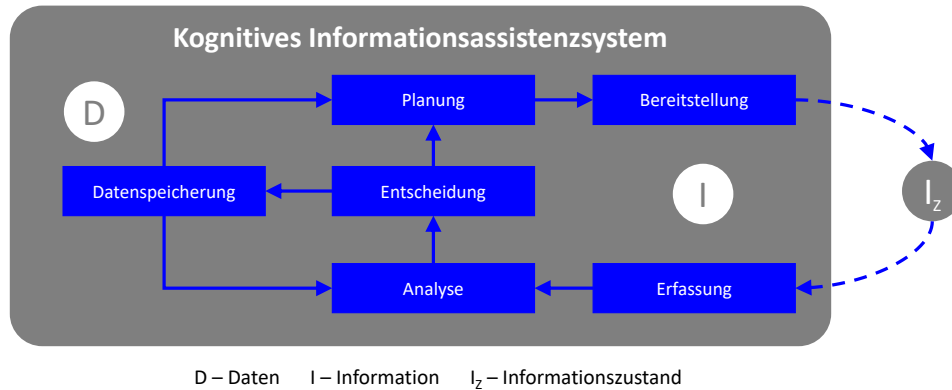


Abbildung 4.3.: Schematische Darstellung der daten- und informationsverarbeitenden Prozessschritte zur kognitiven Informationsassistentz

zur Informationsunterstützung des Menschen. Diese kann das Speichern bzw. Sammeln und Bereitstellen neuer Informationen zum Ergebnis haben.

- **Datenspeicherung:** Diese neuen Informationen und Verknüpfungen werden in den Datensystemen gespeichert.
- **Sammlung:** Wurde ein Informationsbedarf ermittelt, werden die benötigten Informationen aus strukturierten sowie unstrukturierten Daten der verfügbaren Datensysteme abgeleitet und zusammen gestellt.
- **Bereitstellung:** Die Informationen werden anschließend in einer für den Menschen und den Arbeitsprozess geeigneten Art und Weise bereitgestellt. Die Bereitstellung erfolgt als Informationsartefakte, die den Informationszustand der Montageumgebung verändern.

Dem Informationsprozess schließen sich unmittelbar die kognitiven Teilprozesse des Menschen an. Diese werden im folgenden Abschnitt zusammengefasst.

Kognitionsprozess

Der Kognitionsprozess des Menschen umfasst alle kognitiven Teilprozesse zur Aneignung, Interpretation und Anwendung von Wissen. Bereits in Abschnitt 2.2 wurde eine Beschreibung dieser Teilprozesse aus psychologischer Sicht vorgenommen.

Zwischen dem Kognitionsprozess und dem Informationsprozess existiert eine Verbindung über den Informationszustand der Umwelt (Montageumgebung). Dieser entspricht dem Informationszustand I_z der dort enthaltenen Informationsartefakte I_A (siehe Abschnitt 2.3.1). Informationsartefakte übertragen die Informationen aus dem Informationsprozess an den Menschen. Es schließen sich damit die bereits vorgestellten Prozessschritte des Kognitionsprozesses zur bewussten Handlungssteuerung [Ras83; Rea90] an (siehe Abbildung 4.4):

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

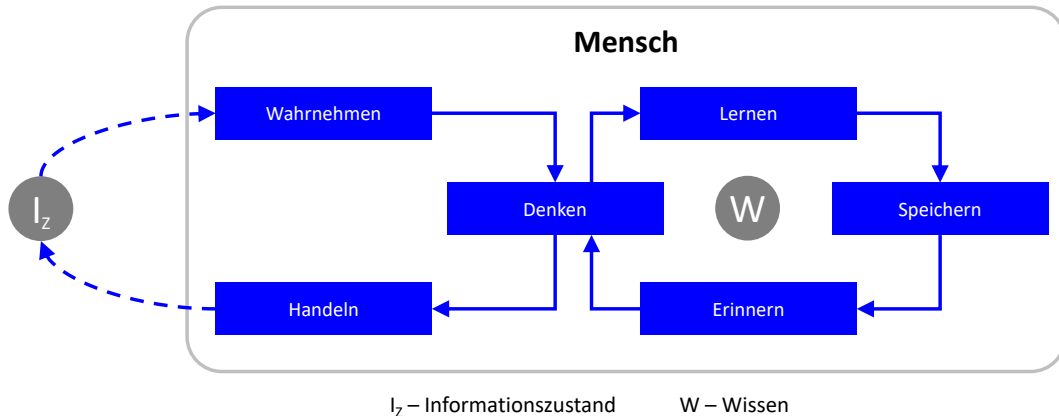


Abbildung 4.4.: Schematische Darstellung der Prozessschritte des Kognitionsprozesses in Anlehnung an [Ras83; Rea90]

- **Wahrnehmen:** Die bereitgestellten Informationen werden durch den Menschen in Abhängigkeit seines Aufmerksamkeitsgrades wahrgenommen (siehe 2.2.1). Hier ist eine enge Verknüpfung mit dem Arbeitsprozess erforderlich, um einerseits die Ablenkung zu reduzieren aber auch um unnötige Kontextwechsel zu vermeiden, welche die Konzentration auf den eigentlichen Arbeitsgegenstand reduzieren.
- **Denken:** Anschließend werden die aufgenommenen Informationen zur Planung und Steuerung der eigenen Handlungen interpretiert. Dazu werden ihre Bedeutung und damit auch die Konsequenzen für die eigene Situation auf Basis der Erfahrungen und dem mentalen Modell [Vol74] eingeschätzt. Zum näheren Aufbau dieses Prozessschrittes wird in diesem Zusammenhang auf die Ergebnisse der kognitiven Aufgabenanalyse in Abschnitt 3.6 verwiesen. Die Entscheidungsleiter zur regel- und wissensbasierten Steuerung der Arbeitshandlungen konkretisiert den inhaltlichen Aufbau dieses Prozessschrittes.
- **Lernen:** Aus der Interpretation und der Reflektion der bereitgestellten Informationen in Abhängigkeit von den eigenen Erfahrungen und dem mentalen Modell können neue Zusammenhänge erkannt und damit erlernt werden, die eine Bedeutung für die eigene Situation haben. Es findet parallel zum Arbeitsprozess durch diese aktive Auseinandersetzung mit Informationen und daraus angeeignetem Wissen stetig informelles Lernen [Era11] statt.
- **Speichern:** Neue Erfahrungen, Zusammenhänge und Veränderungen des eigenen mentalen Modells werden gespeichert.
- **Erinnern:** Das Erinnern ermöglicht den Abruf von bekanntem Wissen, von Erfahrungen sowie dem habituierten mentalen Modell im Zusammenhang mit Interpretations-, Planungs- und Entscheidungsprozessen des Menschen.

- **Handeln:** Das Ergebnis des Kognitionsprozesses ist die Auslösung einer Handlung, die auf den Planungen und Entscheidungen zuvor beruht. Durch diese Handlung wird wiederum eine Veränderung des Informationszustandes der Umwelt (z.B. Interaktion mit kognitivem Informationsassistentensystem, Veränderung der Bauteile) bewirkt, die sowohl vom Menschen als auch vom kognitiven Informationsassistentensystem aufgenommen und zur Ausführung des jeweiligen Verarbeitungsprozesses führt.

Der Kognitionsprozess endet folglich mit der Steuerung einer informationsbasierten Handlung, welche den Informationszustand der Umwelt verändert. Die Handlungen sind in dem vorgestellten konzeptionellen Ansatz Teil des Arbeitsprozesses und werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

Arbeitsprozess

Der Arbeitsprozess des Menschen umfasst die physischen Handlungen, die zur unmittelbaren Ausführung der Arbeitsaufgabe und damit zur Erreichung des Arbeitszieles erforderlich sind. Durch die kognitive Arbeitsanalyse in Abschnitt 3.5 wurden hier die wesentlichen Tätigkeiten Fügen, Handhaben, Justieren und Sonderoperationen identifiziert. Diese bewirken jeweils eine Veränderung der Situation am Arbeitsplatz und damit auch eine Veränderung des Informationszustandes I_Z . Der veränderte Informationszustand I_{Z+1} ist dann Ausgangspunkt des kognitiven Informationsassistentensystems für eine erneute Informationsbereitstellung bzw. für den Menschen, seine folgenden Arbeitshandlungen entsprechend zu planen und umzusetzen.

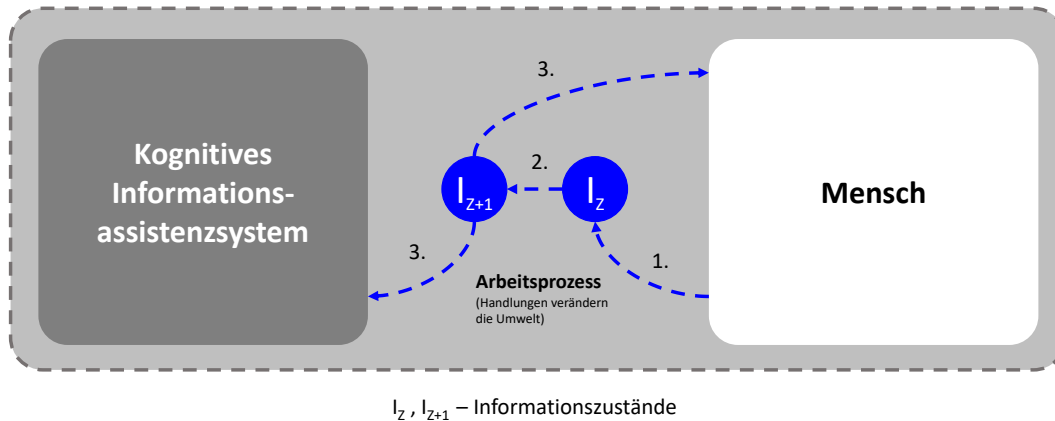


Abbildung 4.5.: Schematische Darstellung der Veränderung des Informationszustandes durch den Arbeitsprozess. Eine Arbeitshandlung wirkt sich auf den aktuellen Informationszustand I_Z der Umwelt aus (1.). Sie verändert diesen zu I_{Z+1} (2.). Der neue Informationszustand wird anschließend durch das kognitive Informationsassistentensystem und den Menschen erfasst (3.).

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

Durch die Veränderung eines Bauteiles verändert sich somit das physische Informationsartefakt, welches Informationen über den Fortschritt oder Erfolg des Arbeitsprozesses enthält. Damit ist der Ausgangspunkt einer jeden Handlung eine Information und das Ergebnis sind wiederum neue Informationen. Dieser Zusammenhang wird schematisch in Abbildung 4.5 illustriert.

4.1.2. Prozessmodell für die kognitive Informationsassistentz

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die drei Teilprozesse der kognitiven Informationsassistentz betrachtet. Dabei wurde gezeigt, dass sowohl der menschliche Kognitionsprozess als auch der technische Informationsprozess einem Regelkreis entsprechen, der dem Prinzip *actio et reactio* folgt. In beiden Fällen ist die Veränderung des Informationszustandes in der Montageumwelt der Auslöser für die Analyse der neuen Situation sowie für die Entscheidung und Planung einer situationsangemessenen Handlungsstrategie. Diese erfordern jedoch die Anwendung von Hintergrundwissen über den Anwendungsbereich der Montage [BA14]. Während der Mensch über ein mentales Modell (siehe Abschnitte 2.2.1 und 2.3) verfügt, welches als Erklärungsmodell der Realität das Denken beeinflusst, benötigt das kognitiv unterstützende Informationsassistentzsystem einen vergleichbaren Mechanismus, der durch das erforderliche Hintergrundwissen die Analyse, Entscheidung sowie Planung kontrolliert. Dieser Mechanismus wird im Folgenden als *digitales mentales Modell* definiert:

Definition 4.1: Das *digitale mentale Modell* (DMM) ist eine technologische Komponente des kognitiven Informationsassistentzsystems, welche die Modellierung und kontinuierliche Optimierung von Handlungswissen (Konzepte, Zusammenhänge und Methoden) zum Arbeitsprozess des Menschen ermöglicht. Es soll im Informationsprozess eine dem Menschen vergleichbare Analyse-, Entscheidungs- und Planungsfähigkeit erlauben, um damit durch eine angepasste Informationsbereitstellung angemessen auf Veränderungen des Informationszustandes der Umwelt zu reagieren.

Das digitale mentale Modell muss dazu initial mit dem erforderlichen Hintergrundwissen des Anwendungsbereiches erstellt werden. Anschließend wird es für die Analyse der Arbeitssituation, die Entscheidung einer Assistenz- bzw. Informationsstrategie und die Planung ihrer Umsetzung eingesetzt. Aus der Beobachtung der erzielten Ergebnisse werden Rückschlüsse über die Angemessenheit der bereitgestellten Informationen und damit ebenfalls über die gewählte Strategie gezogen. In einem kontinuierlichen Selbstoptimierungsprozess wird daraufhin das digitale mentale Modell angepasst sowie verbessert. Es lassen sich daher drei Prozessschritte zur Erstellung und Anwendung des digitalen mentalen Modells unterscheiden:

- **Modellbildung:** In diesem Prozessschritt wird das digitale mentale Modell durch das Erstellen und Verändern von Modellaspekten geprägt, angepasst und optimiert.
- **Modellanwendung:** In diesem Prozessschritt wird das digitale mentale Modell zur Steuerung des Informationsprozesses eingesetzt. Während der Anwendung

werden Informationen zu den erzielten Ergebnissen des Informationsprozesses gesammelt.

- **Modellevaluation:** Anhand der so gesammelten Informationen werden in diesem Prozessschritt die Ergebnisse bewertet und Aussagen über notwendige Veränderungen im digitalen mentalen Modell getroffen, um die Modellanwendung kontinuierlich zu verbessern.

Durch die Anwendung des digitalen mentalen Modells im Informationsprozess wird eine Verbindung zwischen beiden Prozessen hergestellt. Damit lässt sich das Prozessmodell für die kognitive Informationsassistentz gemäß Abbildung 4.6 darstellen.

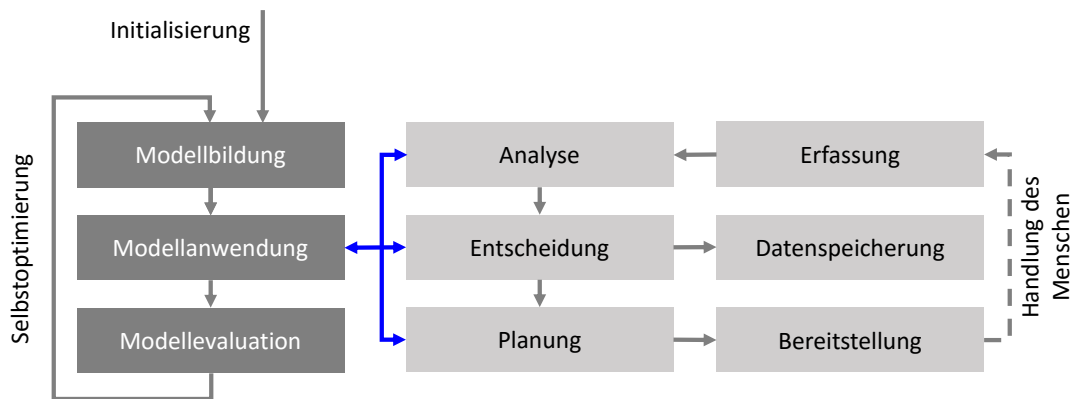


Abbildung 4.6.: Prozessmodell der kognitiven Informationsassistentz

Die zuvor beschriebenen Prozessabläufe orientieren sich am menschlichen Vorbild. Die sensorische Erfassung der Montageumwelt ist vergleichbar der menschlichen Wahrnehmung. Es wird hierbei ein *digitales Abbild* der Realität bzw. der relevanten und beobachtbaren Ausschnitte der Realität erfasst.

Definition 4.2: Das **digitale Abbild** (DA) ist die datentechnische Repräsentation eines für den Informationsprozess relevanten Ausschnittes der Montageumwelt. Es modelliert und speichert den Informationszustand von Entitäten als Verknüpfung von Eigenschaften und Werten.

Der menschliche Denkprozess wird im kognitiven Informationsassistenzsystem durch die Prozessschritte Analyse, Entscheidung und Planung realisiert. Hierbei kommt der zuvor beschriebene Einfluss des digitalen mentalen Modells als Steuerungsprozess in allen drei Prozessschritten zum Tragen. Anschließend wird eine Aktion ausgelöst, die den Menschen durch das Bereitstellen von Informationen im Arbeitsprozess unterstützt.

Das Lernen wird im Assistenzsystem als Selbstoptimierungsprozess des digitalen mentalen Modells umgesetzt. Dadurch passt sich das Assistenzverhalten an die wechselnden Anforderungen des Arbeitsprozesses an. Für den Anwendungsbereich der

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

Montage ist demzufolge Montagewissen erforderlich, auf dessen Grundlage die Analyse, Entscheidung und Planung im Informationsprozess gesteuert und kontinuierlich optimiert wird. Hierbei handelt es sich um ein dem Werker vergleichbares Wissen, welches diesem durch seine Ausbildung, durch Erfahrung und die jeweils für den Arbeitsgang bereitgestellte Montageanleitung zur Verfügung steht (siehe Abschnitt 3.3). Im nächsten Abschnitt wird darum ein Konzept zur Modellierung des Handlungswissens aus vorhandenen Daten und Informationen des Produktentwicklungs- und Produktplanungsprozesses erarbeitet.

4.1.3. Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die enge Verknüpfung des Informationsprozesses mit dem Kognitions- sowie dem Arbeitsprozess diskutiert. Dabei wurde insbesondere auf den damit einhergehenden Übergang von Daten zu Informationen und schließlich zu Wissen eingegangen. Entscheidend ist hierbei der Informationszustand und damit die Rolle der Informationsartefakte, welche Informationen zwischen der digitalen Welt des Assistenzsystems und der mentalen Welt des Menschen vermitteln. Diese Vermittlung ist bidirektional und führt zu der eigentlichen Kommunikation zwischen dem Menschen und dem kognitiv unterstützenden Informationsassistenzsystem.

Während bisher die Prozesse zur kognitiven Automatisierung im Vordergrund standen, soll im folgenden Abschnitt der zweite Aspekt der Konzeption, die Methodik der kognitiven Informationsassistentz, diskutiert werden.

4.2. Methodik der kognitiven Informationsassistentz

Ein Assistenzsystem zur Unterstützung der kognitiven Prozesse des Menschen während der Arbeit konzentriert sich, wie in Abschnitt 4.1 diskutiert, auf eine situationsbezogene, geeignete Bereitstellung von Informationen als Informationsartefakte, sodass das Interpretieren, Verarbeiten und Anwenden der Informationen durch den Menschen mit einem geringen kognitiven Aufwand, widerspruchsfrei und fehlerfrei erfolgen kann. Dadurch wird die Qualität des Arbeitsprozesses und seiner Ergebnisse beeinflusst [AU14].

Mit der Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse Denken, Lernen, Speichern und Erinnern wird bereits das Hauptziel der kognitiven Informationsassistentz festgelegt. Es gilt demzufolge diese Teilprozesse durch einen geeigneten methodischen Ansatz zu unterstützen, der zu ihrer Verbesserung beiträgt ohne die eigentliche kognitive Arbeit vollständig zu automatisieren. Das kognitive Informationsassistenzsystem soll dabei durch den Menschen als Ergänzung der eigenen kognitiven Fähigkeiten wahrgenommen werden, vergleichbar zu bereits bekannten Assistenztechnologien aus dem Lebensalltag, wie zum Beispiel einer akustischen bzw. visuellen Einparkhilfe im Auto. Diese verbessert die Wahrnehmung (Sensoren in einem nicht-sichtbaren Bereich) und die Verarbeitung (Warnung bei Annäherung an Hindernisse) von Informationen in kritischen Situationen (Einparken).

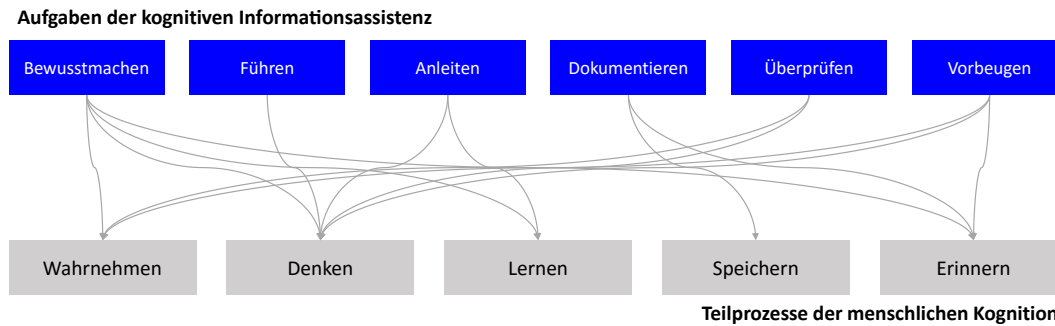


Abbildung 4.7.: Zuordnung der Aufgaben der kognitiven Informationsassistentz zu den jeweils unterstützten Teilprozessen der menschlichen Handlungssteuerung

In [AW15] und [AB15b] wurden sechs Hauptaufgaben zur Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse formuliert:

- Das **Bewusstmachen** von Zuständen und Veränderungen der relevanten Arbeitsumgebung (*workspace awareness*) erhöht die Fähigkeit des Menschen, sich an diese anzupassen und damit planerisch seine eigenen Handlungen zu koordinieren [GG02]. Hier haben wir einerseits die Wahrnehmung von Informationen, die unmittelbar unterstützt wird, genauso wie die Analyse, Entscheidung und Planung der eigenen Handlungen.
- Das **Führen** des Menschen durch komplexe Arbeitsprozesse verstärkt seine Orientierungsfähigkeit und damit die Fähigkeit in kritischen Situationen entscheidungsfähig zu bleiben. Gleichzeitig erhöht sich so die Wahrscheinlichkeit, dass der Arbeitsprozess erfolgreich und zeiteffizient abgeschlossen werden kann [Kok+13].
- Das informationsbasierte **Anleiten** des Menschen in komplexen Arbeitssituationen stellt Verknüpfungen zwischen realen Situationen und abstrakten Informationen her, die durch eine aktive Verarbeitung zu einer Aneignung und Reflektion von Wissen und damit zu Lernen führen [WL91]. Der Unterschied zum Führen ist hier das explizite Ziel der Förderung des individuellen Wissenserwerbs.
- Das **Dokumentieren** des Arbeitsprozesses und der Arbeitsergebnisse erleichtert das Speichern und Erinnern immer komplexerer Informationen und Zusammenhänge, das durch den Menschen nur durch einen entsprechenden Mehraufwand in vergleichbarer Form ausgeführt werden kann.
- Das **Überprüfen** des Arbeitsprozesses bzw. der Arbeitsergebnisse ermöglicht die direkte Rückmeldung von Fehlern. Dadurch wird das Analysieren, Bewerten und Reflektieren der eigenen Handlungen motiviert.

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

- Das **Vorbeugen** von Überlastungen durch eine zu große Informationsmenge und Informationskomplexität erhält die Aufmerksamkeit des Menschen auch in kritischen Situationen [AL11]. Es vermeidet ebenso die Auswirkungen von kognitiven Stress auf die körperliche Situation und trägt damit zur Gesunderhaltung am Arbeitsplatz bei [Rud11].

Mit der Erfüllung dieser sechs Hauptaufgaben unterstützt das kognitive Informationsassistentzsystem die kognitiven Kernprozesse der menschlichen Handlungssteuerung. Die individuelle Zuordnung wird in Abbildung 4.7 schematisch illustriert.

In den folgenden Abschnitten werden nun methodische Konzepte zur Umsetzung der Hauptaufgaben und damit zur kognitiven Informationsassistentz hergeleitet und diskutiert.

4.2.1. Zusammenarbeit durch Team Cognition

In einer umfangreichen Analyse verhaltenspsychologischer Studien [DMM10] kamen DeChurch und Mesmer-Magnus zu dem Ergebnis, dass die Leistungsfähigkeit von Teams durch die Qualität des gemeinsam *geteilten mentalen Modells* (Shared Mental Model) und der damit verbundenen Erfahrungen, Werte und Einstellungen bestimmt wird. Die enge mentale Übereinstimmung lässt insbesondere Expertenteams sehr effektiv und effizient zusammen arbeiten. Dieser Effekt wird in der Literatur [DMM10; BF13] als *Team Cognition* bezeichnet. Das gemeinsame mentale Modell vereinfacht dabei wichtige Prozesse der Koordinierung und Kooperation, wie zum Beispiel die Aufgabenverteilung, Kommunikation oder das Lernen.

Aus konzeptioneller Sicht lassen sich Johnson et al. [Joh+07] zufolge fünf Faktoren für die Effektivität und Übereinstimmung des geteilten mentalen Modells eines Teams und demzufolge für eine gute Team Cognition bestimmen:

- Das gemeinsame **Teamwissen** umfasst dabei das Vertrauen jedes Einzelnen in die Fähigkeiten des Teams eine Aufgabe zusammen zu lösen. Dieses Wissen bezieht sich insbesondere auf die Festlegung gemeinsamer Ziele und Vorgehensweisen, aber auch auf das kollektive Verstehen der Aufgabensituation und das Wählen des richtigen Lösungsansatzes.
- Die gemeinsamen **Teamfähigkeiten** beziehen sich auf die vorhandenen kognitiven bzw. physischen Fähigkeiten des Teams, eine Aufgabe zusammen zu lösen. Diese beinhalten zu einem großen Anteil Kommunikations- und Koordinierungsfähigkeiten, die zur Strukturierung der gemeinsamen Arbeit erforderlich sind.
- Eine vergleichbare **Teameinstellung** gegenüber den Teammitgliedern bzw. der Aufgabe führt zu ähnlichen Wahrnehmungen und Entscheidungen bezogen auf die gemeinsame Aufgabe. Hier bestimmen die gemeinsamen Werte die Effektivität der Entscheidungs- und Arbeitsprozesse.

- Die **Teamdynamik** wird durch eine übereinstimmende Festlegung und Wahrnehmung von Rollen, Verantwortlichkeiten und dem Informationsaustausch positiv beeinflusst.
- Die gemeinsam verfügbaren **Teamressourcen** legen die technologischen, zeitlichen, räumlichen und organisatorischen Rahmenbedingungen und Einschränkungen fest, welche die Effektivität des Teams beeinflussen. Eine hohe Synchronität in der Ausübung der Teamaufgaben steigert so zum Beispiel die Übereinstimmung des geteilten mentalen Modells, da überflüssige Kontextwechsel zwischen den Teammitgliedern entfallen.

Das Konzept der Team Cognition soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die kognitive Informationsassistentz übertragen werden, um so eine effektive Zusammenarbeit zwischen dem Menschen und dem kognitiven Informationsassistentzsystem herzustellen. Hierbei gilt die Annahme, dass ein digitales mentales Modell (siehe Abschnitt 4.1.2), welches ähnlich dem menschlichen Vorbild relevante Konzepte, Beziehungen, Wirkungsprinzipien, Grundregeln oder auch Vorgehensweisen zur Problemlösung in der Arbeitsdomäne abbildet, zu einer höheren Effektivität der Zusammenarbeit beiträgt, wenn es zur Steuerung der Informationsassistentz herangezogen wird. Darum ist es wichtig, das mentale Modell des Menschen zu verallgemeinern und durch sein digitales Gegenstück anzunähern, da so die Dissonanz zwischen dem Menschen und dem kognitiv unterstützenden Informationsassistentzsystem reduziert wird. Eine Annäherung kann hier jedoch nur über eine Abbildung der wesentlichen Konzepte, Semantik sowie Regeln der Arbeitsdomäne erfolgen bzw. über ein vergleichbares Entscheidungsverhalten (siehe Abschnitt 3.6), da sich das individuelle mentale Modell des Einzelnen nicht beobachten und formalisieren lässt.

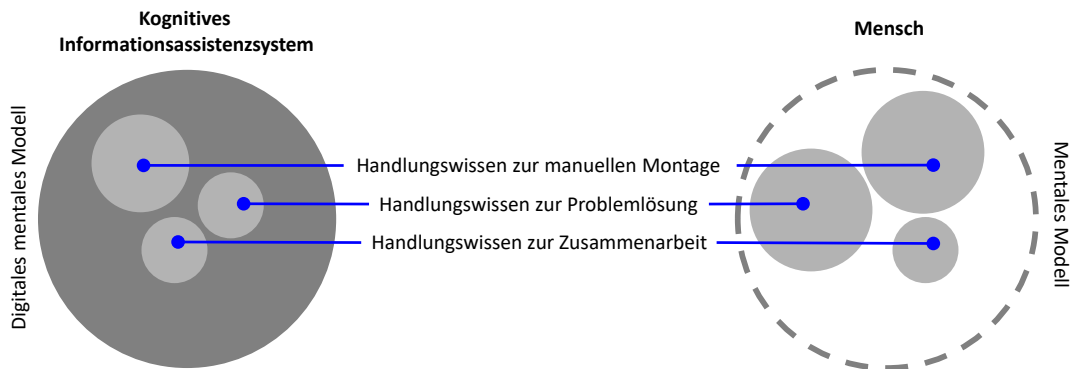


Abbildung 4.8.: Die semantische Ähnlichkeit des digitalen mentalen Modells des kognitiven Informationsassistentzsystems mit dem mentalen Modell des Wokers wird über die Abbildung relevanter Aspekte der Arbeitsdomäne hergestellt und führt zu einer effektiveren Zusammenarbeit.

Demzufolge muss das digitale mentale Modell bezogen auf die Unterstützung des Wokers in der manuellen Montage das Handlungswissen zu den Zielen, Problemen,

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

Lösungsansätzen und Bewertungsmaßstäben der Montage sowie zu einer effektiven und flexiblen Zusammenarbeit mit dem Werker abbilden können.

Das kognitive Informationsassistentzsystem wird damit zum Kooperationspartner des Werkers. Es unterstützt ihn bei der Bewältigung seiner Montageaufgaben durch die teilweise Übernahme kognitiver Arbeitsprozesse (z.B. Erinnern) bzw. durch die situativ passende Bereitstellung der erforderlichen Informationen im gemeinsamen Arbeitsprozess. Die Aufgaben der kognitiven Informationsassistentz (siehe Abschnitt 4.2) werden somit als Handlungswissen im digitalen mentalen Modell des kognitiven Informationsassistentzsystem modelliert. Durch die semantische Überdeckung des digitalen mentalen Modells sowie des mentalen Modell des Werkers wird die Grundlage einer effektiven Zusammenarbeit gebildet (siehe Abbildung 4.8).

Der folgende Abschnitt wird sich nun mit einem methodischen Modell zur Umsetzung der Flexibilität im kooperativen Verhalten mit dem Werker auseinandersetzen. Die anderen beiden Aspekte werden als Bestandteil der technologischen Konzeption in Abschnitt 4.3.3 (Modellierung des Handlungswissens) und in Abschnitt 4.3.4 (Digitale Handlungssteuerung) diskutiert.

4.2.2. Zusammenarbeit durch Cognitive Apprenticeship

Im vorangegangenen Abschnitt wurde das Konzept der Team Cognition als Leitidee für die Umsetzung einer effektiven Zusammenarbeit zwischen dem kognitiven Informationsassistentzsystem und dem Werker vorgestellt. Untersuchungen mit menschlichen Teams zeigen, dass ein Faktor dieser Team Cognition ein gemeinsames Rollenverständnis sowie eine kooperative Dynamik in der Annahme und Auslegung der Rollen und Aufgaben ist [BF13; Joh+07; Co0+00]. Diese Dynamik entsteht durch wechselnde Arbeits- und Aufgabensituationen und zeigt ein leistungsfähiges Reagieren des Teams darauf. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll der kognitiven Informationsassistentz ein vergleichbar leistungsfähiges Kooperationsverhalten zwischen dem Werker und dem kognitiven Informationsassistentzsystem zugrunde gelegt werden. Die Basis dafür bildet ein dynamischer Rollenwechsel des kognitiven Informationsassistentzsystems abhängig vom Unterstützungsbedarf der Montagesituation. Reichen die als relevant eingeschätzten Informationen aus, um die Arbeitssituation selbständig zu bewältigen, so werden nur diese bereitgestellt. Wird jedoch eine kritische Arbeitssituation erkannt, in der ein Einschreiten des kognitiven Informationsassistentzsystems erforderlich wird, muss das kognitive Informationsassistentzsystem intervenieren und aus der Rolle des aktiv begleitenden *Peers* in die Rolle des aktiv anleitenden *Experten* wechseln. In dieser Rolle steht die Vermittlung des erforderlichen Handlungswissens und damit der kognitive Arbeitsprozess Lernen im Vordergrund.

In diesem Zusammenhang nutzt die vorliegende Arbeit methodische Konzepte des situierten, informellen Lernens zur flexiblen Unterstützung des Werkers. In den folgenden Abschnitten werden die Basiskonzepte hierzu vorgestellt und für die weitere methodische Konzeption der kognitiven Informationsassistentz verwendet.

Informelles Lernen in authentischen Arbeitssituationen

Untersuchungen zufolge beruhen ca. 60 bis 80 Prozent des menschlichen Handlungswissens am Arbeitsplatz auf freiwilligen und nicht geplanten Lernprozessen, dem *informellem Lernen* [Doh01]. Dieses findet gemäß Eraut [Era11] in gruppendynamischer Zusammenarbeit oder als ein Nebenergebnis des Arbeitens statt. Hierbei entsteht ein Lernanlass allein als Reaktion auf Änderungen in der Umwelt, die mit dem eigenen mentalen Modell in Übereinstimmung gebracht werden. Korrelation führt zu Bestätigung und Verankerung von Erfahrungswissen in dem aktuellen Arbeitskontext, während Dissonanzen zu Erklärungsversuchen und damit auch zu informellem Lernen führen. Reich nennt hier das schrittweise Annähern (*Assimilation*) bzw. das Erweitern (*Akkomodation*) des eigenen mentalen Modells als menschliche Lösungsstrategien für den Umgang insbesondere mit komplexen Situationen [Rei08]. Jede Handlung führt so zu einer Erfahrung, durch deren Reflektion neues Wissen gewonnen wird.

Diese Betrachtung des informellen Lernprozesses lässt sich der konstruktivistischen Lerntheorie zuordnen (siehe Abschnitt 2.2.2). Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass durch informelles Lernen nicht träges Wissen sondern *aktives Wissen* entsteht, welches eng mit der Ausgangssituation verknüpft ist und damit später in ähnlichen Situation besser abgerufen werden kann [Dre08]. Je authentischer die Lernsituation ist, also umso greifbarer das Problem bzw. wichtiger die Problemlösung sind, desto enger erfolgt hier die Verknüpfung des angeeigneten Wissens mit dem Kontext der Situation. Wenn nicht nur die Situationen so real wie möglich, sondern auch die Lernumgebung in einer realen Umgebung Informationen und Werkzeuge zum konstruktiven Umgang mit der Lernsituation ermöglichen, spricht man hier von *situiertem Lernen* [DD11]. Es lassen sich drei wesentliche Ansätze für diese Lernform unterscheiden:

- Durch den Ansatz der **Anchored Instruction** wird eine realitäts-nachempfundene Lernsituation geschaffen. Hierbei wird eine Problemsituation durch das Mittel der *Narration* in einem erzählerischen Kontext eingebettet und durch diesen wird die Motivation und Aufmerksamkeit des Lernalers gesteuert [Nie01].
- Durch ein **Goal-based Scenario** wird eine ebenso künstliche Aufgabenstellung erzeugt, in welche der Lerner eine möglichst authentische Rolle einer Rahmenhandlung einnimmt und zur Lösung der Aufgabe beiträgt.
- Das **Cognitive Apprenticeship Model** konzentriert sich auf die Sichtbarmachung metakognitiver Lösungsstrategien nach einem Meister-Schüler-Prinzip im realen Problemlöseprozess [CBN89; Rei08]. Durch eine abnehmende Anleitung des Lernalers (*Scaffolding*) wird damit seine zunehmende Selbständigkeit gefördert [Ley+13].

Durch das kognitive Informationsassistentzsystem muss also eine authentische Arbeitssituation für die Vermittlung von Informationen mit dem Ziel der Aneignung

4. Kognitive Informationsassistenten in der Montage

von Wissen genutzt werden. Der Vorteil liegt hierbei darin, dass die Arbeitssituation an sich authentisch ist und somit keine künstliche Brücke zwischen den Informationen und der realen Arbeitssituation geschaffen werden muss. Dadurch lassen sich die Informationen unter einem geringeren kognitiven Aufwand für den Menschen erfassen und interpretieren. Das kognitive Informationsassistentensystem nutzt demzufolge die enge Kopplung an die aktuelle Arbeitssituation des Werkers zur Ausführung seiner Assistenzaufgaben (siehe Abbildung 4.7).

Sowohl der Ansatz der Anchored Instruction als auch Goal-based Scenarios erschaffen einen künstlichen Rahmen für die Vermittlung von Wissen. Dieser Aufwand ist notwendig, da sie nicht von einer realen Problemsituation ausgehen. Für eine Anwendung innerhalb des Arbeitsprozesses sind sie daher jedoch nicht geeignet. Vielmehr zeichnet sich das Cognitive Apprenticeship Model durch seine hohe Variabilität und Skalierbarkeit aus. Im folgenden Abschnitt werden die Eigenschaften und Komponenten des Cognitive Apprenticeship Model näher im Bezug zur vorliegenden Arbeit erläutert.

Erläuterungen zum Cognitive Apprenticeship Model

Das Cognitive Apprenticeship Model (CAM) wurde bereits 1989 durch Collins, Brown und Newman in [CBN89] formuliert. Es orientiert sich an der klassischen Ausbildung nach dem Meister-Schüler-Prinzip. Ein Fachexperte nimmt dabei die Rolle des Meisters ein und leitet den Auszubildenden als Schüler durch einen Problemlöseprozess. Durch die skalierbare und flexible Strukturierung des CAM werden die individuellen Lerncharakteristiken des Auszubildenden adressiert und gestärkt [Nie01]. Dazu sieht dieses konstruktivistische Lernmodell nach [BKG01; CBN89] sechs Basismethoden vor:

- **Modellieren** (modelling): Durch diese Methode wird ein Problemlöseprozess innerhalb einer realen Situation durch den Experten vorgeführt und kommentiert. Hierbei steht zunächst die Externalisierung und Weitergabe des metakognitiven Denkmodells zur Herangehensweise und Lösung eines spezifischen Problems im Vordergrund. Der Experte darf den Auszubildenden dabei nicht überfordern, um den Effekt dieser Methode nicht zu gefährden.
- **Anleiten** (coaching): Mit dieser Methode wird nun dem Auszubildenden die Aufgabe überlassen, einen vergleichbaren Problemlöseprozess in Begleitung des Experten nachzuvollziehen. Dieser gibt Hinweise und Hilfen bzw. unterstützt bei der Lösung nach Bedarf, damit der Auszubildende die Problemlösung erreicht.
- **Strukturieren** (scaffolding): Durch diese Methode schafft der Experte dem Auszubildenden ein metakognitives Basisgerüst, mit dem ein Problem strukturiert gelöst werden kann. Ziel der Methode ist die Übernahme dieser Strukturen bzw. Lösungsstrategien durch den Auszubildenden. Im Zusammenhang mit dem gezielten Strukturieren wird das zunehmende Ausblenden (fading) der unterstützenden Strukturen verwendet. Dadurch erlangt der Auszubildende

eine zunehmende Eigenverantwortlichkeit in Korrelation mit der Aneignung der Grundzüge des metakognitiven Basisgerüsts. In der Lehrpraxis nimmt der Experte sich in der Anleitung und Strukturierung des Auszubildenden schrittweise zurück und überlässt diesem die Kontrolle des Problemlöseprozesses.

- **Artikulieren** (articulation): Diese Methode zielt darauf ab, den kontinuierlichen Wissenserwerb und den Lernprozess des Auszubildenden sichtbar zu machen. Durch das Benennen der eigenen Ziele und Strategien im Problemlöseprozess kann der Experte die korrekte Übernahme des metakognitiven Basisgerüsts bewerten und korrigierend eingreifen.
- **Reflektieren** (reflection): Durch diese Methode soll der Auszubildende sich bewusst mit der metakognitiven Problemlösestrategie auseinandersetzen und sie aktiv auch mit anderen Situationen bzw. Problemen vergleichen. Die Reflexion fördert dabei das Gewinnen von Erkenntnissen, die erst durch eine abstraktere Betrachtung zutage kommen.
- **Erkunden** (exploration): Die freie Erkundung weiteren Wissens zu einem Problem oder seiner Lösung ist Hauptziel dieser Methode. Durch das Bereitstellen ergänzender und erweiternder Informationen bzw. Hilfsmittel werden dem Auszubildenden die entsprechenden Werkzeuge gegeben, eigenständig neues Wissen anzueignen und auf die eigene Situation anzuwenden.

Neben diesen methodischen Grundbausteinen des CAM, nennen Collins, Brown und Newman [CBN89] den *Inhalt*, die *Reihenfolge* und den *soziokulturellen Kontext* als wesentliche Ankerpunkte des Modells. So ist die Verfügbarkeit der Fachinhalte sowie Informationen zu Lösungsstrategien und Heuristiken entscheidend für die Aneignung des metakognitiven Basisgerüsts und die erfolgreiche Anwendung des so erworbenen Wissens. Genauso spielt hier die Übersicht über den Zusammenhang von Teilschritten im größeren Kontext sowie die schrittweise Steigerung der Schwierigkeit eine große Rolle. Letztlich ist aber das reale Problemszenario entscheidend, da nur durch dieses eine Eigenmotivation des Auszubildenden erreicht werden kann. Im anschließenden Abschnitt wird die Anwendung des CAM für die kognitive Informationsassistentz erörtert.

4.2.3. Anwendung für die kognitive Informationsassistentz

Im vorangegangenen Abschnitt wurde das Cognitive Apprenticeship Model mit einem besonderen Fokus auf die methodischen Bausteine näher vorgestellt. Es bildet ein geeignetes Rahmengerüst für die Unterstützung der kognitiven Informationsassistentz im Arbeitsprozess, da:

1. durch die enge Kopplung an ein zu lösendes Problem im Arbeitsprozess die Eigenmotivation des Werkers und damit die Grundvoraussetzung für das Verstehen von Informationen und für informelles Lernen geschaffen wird,

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

2. die Befähigung des Werkers das Problem durch eigenständige Aneignung von Lösungsstrategien und verbundenem Handlungswissen zu lösen im Vordergrund steht sowie
3. die Flexibilität und Skalierbarkeit des Modells Handlungsspielräume in seiner Umsetzung ermöglichen.

Das CAM wurde bereits für das systematische Wissensmanagement in Unternehmen angewendet. [Che+14] stellt Effektivitätssteigerungen durch den Einsatz eines CAM-basierten Ansatzes zur Vermittlung von Standardarbeitsprozeduren in der Metallverarbeitung fest. Hier muss jedoch kritisch eingewendet werden, dass die Externalisierung dieser Prozeduren zwar dem CAM folgt, die Internalisierung aber asynchron erfolgt und weitestgehend auf wesentliche Ansätze des Modells verzichtet. Somit gibt es kein unterstützendes bzw. reflektives Zusammenspiel zwischen Experte und Auszubildendem. In [Po+12] hingegen wird das CAM in einem mobilen Lernsystem integriert, welches Krankenschwestern im Rahmen der Ausbildung anleitet und zum Beispiel durch Sensoren an einem Lern-Dummy die korrekte Anwendung kontrolliert. Thurman et al. adaptierte in [TBM97] das CAM als konzeptionelles Verfahren zum Training eines intelligenten Expertensystems. Hier nimmt der Mensch die Rolle des Experten ein und das technologische System übernimmt durch Beobachtung und Bewertung dessen Handlungsstrategien.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das CAM als methodisches Grundmodell für die flexible kognitive Informationsassistentz des Werkers im Montagearbeitsprozess verwendet. Das schrittweise Vorstrukturieren von Arbeitsaufgaben und die Begleitung des Werkers durch eine situative Informationsbereitstellung bzw. der Wechsel in eine aktive Expertenrolle des kognitiven Informationsassistentzsystems nutzen die Montagesituation für das Vermitteln fehlenden Wissens und zur effektiven, kooperativen Zusammenarbeit. Die skalierbare Unterstützung durch das kognitive Informationsassistentzsystem soll dabei die individuelle Einstellung auf die Informationsbedarfe des Werkers sicherstellen.

Im konzeptionellen Lösungsansatz der Arbeit nimmt damit das kognitive Informationsassistentzsystem die Rollen des Peers und des Experten ein, während der Worker in der Rolle des Auszubildenden von dem Wissen und den Erfahrungen des kognitiven Informationsassistentzsystems profitiert¹. Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Handlungsziele des Werkers innerhalb der manuellen Montage in einem Modell mit den Assistenzzielen des kognitiven Informationsassistentzsystem verbunden.

Handlungsziele und Assistenzziele

In den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits der Zusammenhang zwischen kognitiver Informationsassistentz und informellem Lernen motiviert. Situierendes, in-

¹An dieser Stelle ist genauso der Rollenwechsel des Werkers zum Experten interessant, um so zum Beispiel bewährte Handlungsmuster vom Worker zur Optimierung des digitalen mentalen Modells des kognitiven Informationsassistentzsystems einzusetzen. Dies liegt jedoch nicht im Fokus der Betrachtungen.

formelles Lernen ist dabei der methodische Ansatz der vorliegenden Arbeit den manuellen Montageprozess als Ursprung für die Informationsvermittlung und damit für das Lernen von Fakten, Prozeduren und Konzepten zu nutzen. Hierfür müssen jedoch zunächst die Handlungsziele des Werkers näher betrachtet werden, um so auf adäquate Assistenzziele des kognitiven Informationsassistenzsystems zu schließen.

Blooms Taxonomy von Lernzielen [Blo+56] bzw. dessen Überarbeitung durch Anderson & Krathwohl [AK01] unterscheiden sechs wesentliche Wissens- bzw. Könnensziele im Zusammenhang mit der kognitiven Verarbeitung von Informationen: *Erinnern* (remember), *Verstehen* (understand), *Anwenden* (apply), *Analysieren* (analyze), *Bewerten* (evaluate) und *Erzeugen* (create). Diese bauen teilweise hierarchisch aufeinander auf und repräsentieren die aktive Verarbeitung, Aneignung und Nutzung von Wissen durch den Menschen. Sie stehen damit in einem engen Bezug zum Wissensmodell aus Abschnitt 2.3.1 und zum Modell der bewussten Handlungssteuerung aus Abschnitt 2.2. Durch das Erinnern wird Wissen aus Informationen, dem mentalen Modell bzw. aus Erfahrungen verfügbar gemacht. Das Verstehen ermöglicht die Interpretation und die Anwendung der Informationen im Kontext des Arbeitsprozesses. Durch das Analysieren und Bewerten von Informationen werden Denk- sowie Lernprozesse aktiviert und neues Wissen als Erfahrung bzw. Beitrag zum mentalen Modell erzeugt.

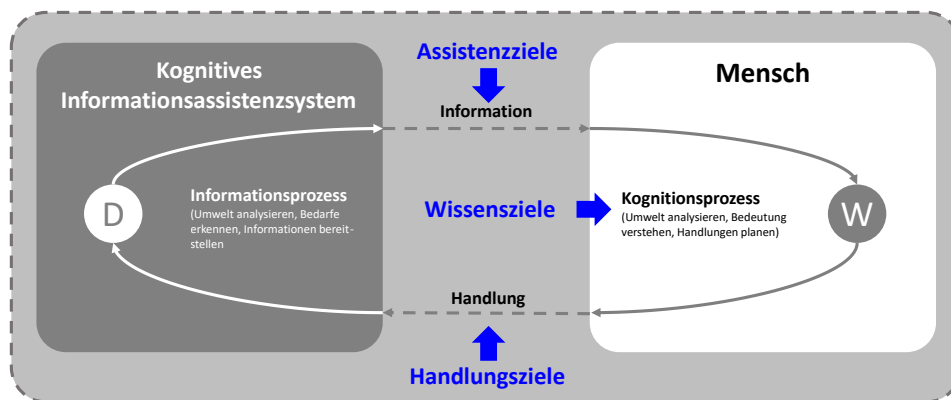


Abbildung 4.9.: Zusammenhang zwischen den Handlungszielen, den Wissenszielen und den Assistenzzielen des kognitiven Informationsassistenzsystems

Im Konzept der vorliegenden Arbeit bilden die Informationen des kognitiven Informationsassistenzsystems die Grundlage für die darauf basierenden Arbeitshandlungen des Werkers. Diese werden durch das übergeordnete Ziel der Fertigung von Bauteilen und Produkten durch Fügen geleitet. Die dabei zu beachtenden Grundprinzipien und Werte (siehe Abschnitt 3.5, Abbildung 3.7) legen die Handlungsziele für den Werker fest: Kundenanforderungen erfüllen, Konstruktionsvorgaben einhalten, Fehler- und Ausschüsse vermeiden, Liefertermin und Qualitätsrichtlinien einhalten. Dadurch wird genauso das Ziel für die kognitive Informationsassistenz bestimmt. Die Bereitstellung von Informationen muss den Werker demzufolge befähigen die manuelle Montage

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

fachlich richtig und zeitlich effektiv auszuführen, um die genannten Handlungsziele erfüllen zu können. Dazu orientiert sich der methodische Lösungsansatz an den zuvor eingeführten Wissens- und Könnenszielen nach Anderson & Krathwohl, um einen mehrstufigen Ansatz zur Definition der Assistenzziele abzuleiten (siehe Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1.: Die Handlungsziele des Werkers in der manuellen Montage sind indirekt mit seinen Wissenszielen verbunden. Diese werden in Ziele des kognitiven Informationsassistenzsystems überführt.

Wissensziel	Beschreibung	Assistenzziel
<i>Erinnern</i>	Der Werker muss relevante Informationen erkennen und interpretieren können.	Relevante Informationen für die aktuelle Arbeitssituation identifizieren und im Arbeitsprozess visualisieren
<i>Verstehen</i>	Der Werker muss Informationen zusammenfassen, umstrukturieren und reproduzieren können.	Bedeutung, Struktur und Zusammenhang von Informationen verdeutlichen und visualisieren
<i>Anwenden</i>	Der Werker muss Informationen in bekannten sowie neuen Situationen anwenden können.	Relevante Informationen für die aktuelle Arbeitssituation identifizieren und im Arbeitsprozess visualisieren
<i>Analysieren</i>	Der Werker muss Informationen zur Lösung von Problemen anwenden und vergleichen können.	Lösungsalternativen vorschlagen und Bewertungskriterien zur Problemlösung visualisieren
<i>Bewerten</i>	Der Werker muss Informationen überprüfen und beurteilen können.	Zugang zu und Exploration von verfügbaren sowie relevanten Informationen ermöglichen
<i>Erzeugen</i>	Der Werker muss neue Informationen erkennen und festhalten können.	Dokumentation von neuen Informationen unterstützen

In Abbildung 4.9 wird der Zusammenhang zwischen den Handlungs-, Wissens- und Assistenzzielen schematisch dargestellt. Die Wissens- und Könnensziele sind allgemeiner Natur und unabhängig von den Handlungszielen des Werkers. Sie beziehen sich auf seine kognitiven Fähigkeiten im Umgang mit Informationen und Wissen. Die Assistenzziele hingegen bestimmen die Art und Weise der Informationsbereitstellung, welche wiederum den Kognitionsprozess des Menschen beeinflusst.

Unterstützung während der manuellen Montage

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Assistenzziele zur Unterstützung der Wissens- und Handlungsziele des Werkers hergeleitet. Zuvor wurde bereits das Cognitive Apprenticeship Model als methodischer Lösungsansatz zur Umsetzung der kognitiven Informationsassistentz eingeführt. Nun sollen die Assistenzziele mit dem Arbeitsprozess der manuellen Montage und dem CAM zusammengeführt werden, um

so das methodische Prinzip zur Unterstützung des Werkers zu erläutern. Dazu wird ein Modell entwickelt, welches diese unterschiedlichen Komponenten zueinander in Beziehung setzt und miteinander verbindet. Die Struktur des Arbeitsprozesses bildet dabei die Basis. Der Arbeitsprozess der manuellen Montage unterteilt sich dabei in die bereits bekannten kognitiven Phasen der *Analyse*, *Entscheidung* sowie *Planung* (siehe Abschnitt 3.6). Dem schließt sich die Phase der physischen *Handlungsausführung* an.

In Abbildung 4.10 wurde nun eine Zuordnung der Wissensziele sowie der Assistenzziele (siehe Tabelle 4.1) zu den Phasen des Arbeitsprozesses vorgenommen. Es zeigt sich, dass in der kognitiven Erfassung und Interpretation der Arbeitssituation durch den Werker das Erinnern, Verstehen und Analysieren von Informationen und Zusammenhängen im Vordergrund steht. Die Phase der Entscheidung beinhaltet darüber hinaus das Bewerten von Informationen. Während der physischen Handlungsausführung wird das zuvor erarbeitete Wissen angewendet und es wird das Erzeugen von Informationen motiviert.

Durch die weitere Zuordnung der Methoden des CAM wird der Einsatz der methodischen Komponenten dieses Modells im Rahmen der kognitiven Informationsassistentz deutlich:

- **Modellieren:** Das kognitive Informationsassistentzsystem modelliert über den gesamten Arbeitsprozess hinweg das Vorgehen zur Lösung der Montageaufgabe. Durch den Einsatz des digitalen mentalen Modells wird eine Grundannahme über den aktuellen Handlungsbedarf und die daraus folgenden Handlungsoptionen getroffen.
- **Anleiten:** Das kognitive Informationsassistentzsystem schlägt dem Werker eine Handlungsoption vor und stellt die dafür relevanten Informationen als Montageanleitung bereit.
- **Strukturieren:** Das kognitive Informationsassistentzsystem strukturiert durch die schrittweise Anleitung der Arbeitsschritte den kognitiven und physischen Arbeitsprozess des Werkers. Dabei reduziert es die Struktur bei Zunahme der Eigenkompetenz des Werkers. Es tritt damit aus der Rolle des Experten zurück in die Rolle des Peers.
- **Reflektion:** Das kognitive Informationsassistentzsystem stellt Informationen zur übergeordneten Strukturierung des physischen Arbeitsprozesses bereit.
- **Artikulieren:** Das kognitive Informationsassistentzsystem ermöglicht das Vorschlagen einer Vorgehensweise und somit die eigenständige Planung des physischen Arbeitsprozesses durch den Werker. Es gibt Rückmeldungen zu möglichen Problemen im geplanten Ablauf.
- **Erkunden:** Das kognitive Informationsassistentzsystem ermöglicht dem Werker durch Bereitstellung zusätzlicher Informationen zur Arbeitsaufgabe die Auseinandersetzung mit komplexen Zusammenhängen und das eigenständige Erkennen und Erlernen von geeigneten Handlungsweisen.

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

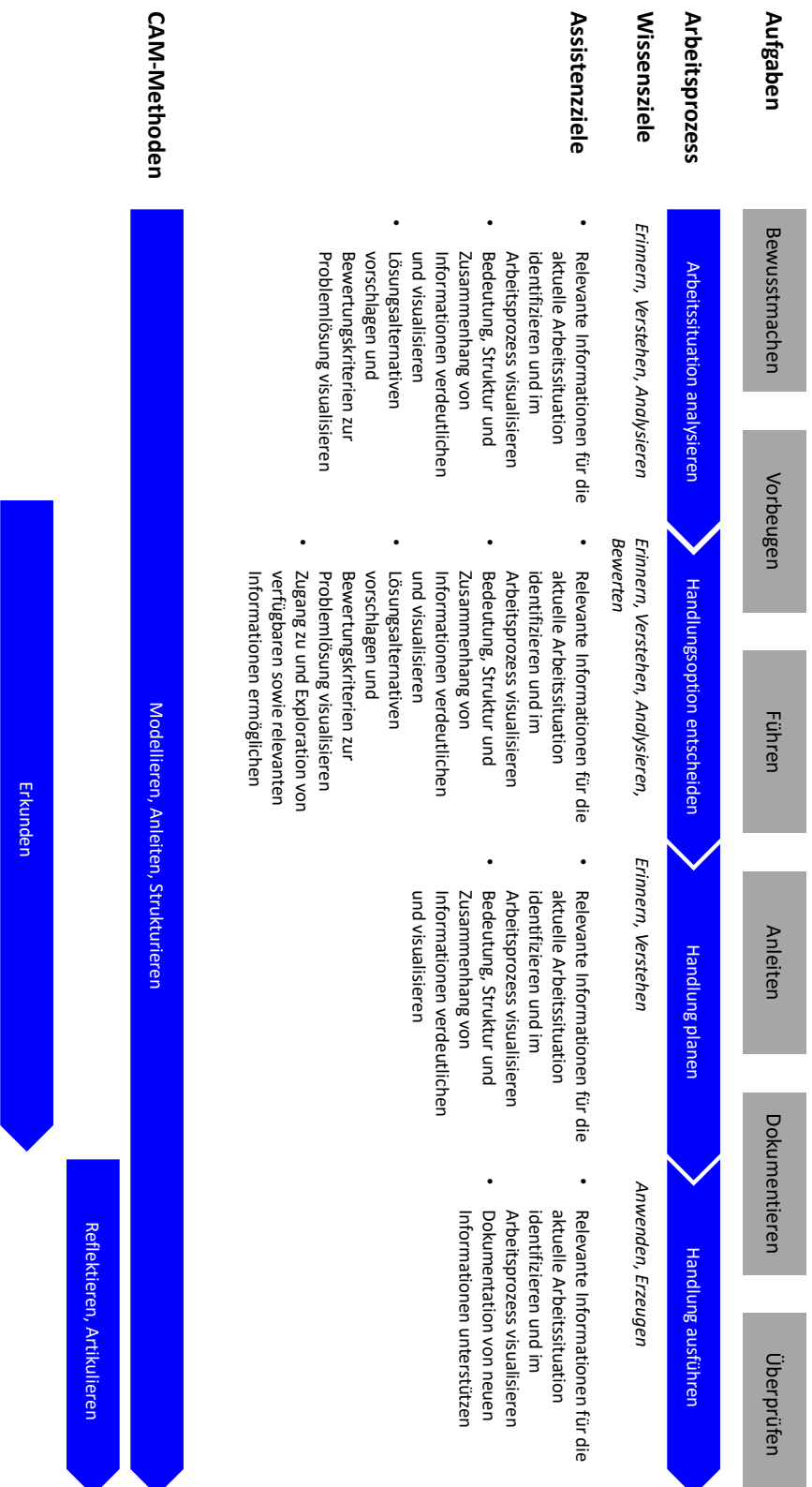


Abbildung 4.10.: Die Aufgaben, Ziele der kognitiven Informationsassistentz werden in diesem Modell mit dem Arbeitsprozess, den Wissenszielen und den methodischen Komponenten des Cognitive Apprenticeship Model verknüpft.

Diese fünf Methoden des Cognitive Apprenticeship Model werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur kognitiven Unterstützung des Werkers eingesetzt. Eine Erläuterung ihrer Umsetzung erfolgt in Kapitel 5.

4.2.4. Zusammenfassung

Der methodische Ansatz der vorliegenden Arbeit überträgt das Konzept der Team Cognition auf die Zusammenarbeit zwischen Mensch und kognitivem Informationsassistenzsystem. Dabei repräsentiert das digitale mentale Modell des kognitiven Informationsassistenzsystems eine Verallgemeinerung des erforderlichen Handlungswissens für die Arbeitsdomäne und die Zusammenarbeit mit dem Worker. Dadurch soll sich die Effektivität der Zusammenarbeit steigern. Um die Flexibilität des kognitiven Informationsassistenzsystems zu gewährleisten wurde der Ansatz des Cognitive Apprenticeship gewählt, da sich dieser besonders für die Informationsvermittlung in authentischen Arbeitssituationen eignet. Es wurde daher ein Modell entwickelt, welches die Methoden des Cognitive Apprenticeship mit den Wissenszielen des Workers im Montageprozess sowie mit den Zielen des kognitiven Assistenzsystem verbindet.

Die beiden Aspekte Fähigkeit und Handlungswissen im digitalen mentalen Modell werden im folgenden Abschnitt als Bestandteil der technologischen Diskussion wieder aufgegriffen. Zuvor erfolgt jedoch die Entwicklung eines Architekturmodells für die kognitive Informationsassistenz.

4.3. Technologie der kognitiven Informationsassistenz

In den vorangegangenen Abschnitten standen die zwei Aspekte *Prozesse* sowie *Methodik* im Mittelpunkt der konzeptionellen Betrachtungen. In diesem Abschnitt soll im Anschluss daran der letzte Aspekt, die *Technologie* der kognitiven Informationsassistenz, konkretisiert werden. Damit sollen die technologischen Komponenten der kognitiven Informationsassistenz identifiziert und beschrieben werden.

Den Ausgangspunkt der Konzeption bildet in Abschnitt 4.3.1 die Entwicklung eines Architekturmodells, welches die technologischen Bestandteile schrittweise erarbeitet und systematisiert.

4.3.1. Entwicklung eines Architekturmodells

In Abschnitt 4.1 wurde der Prozess der kognitiven Informationsassistenz als digitales Spiegelbild der menschlichen Informationsverarbeitungsprozesse zur Handlungssteuerung entworfen. Darauf folgend wurde in Abschnitt 4.2 die Methodik der kognitiven Informationsassistenz aus kognitions- und lernpsychologischen Modellen abgeleitet. In diesem Abschnitt erfolgt nun der Architekturentwurf für eine technologische Umsetzung des erarbeiteten Prozesses und der gewählten Methodik. Er ist erforderlich, um aufbauend darauf die technologische Konkretisierung der Komponenten zu diskutieren.

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

Im Software-Engineering werden *Architekturmodelle* zur Ordnung und Abstraktion von funktionalen Aufgaben und Verarbeitungsstrukturen bzw. zur Modellierung ihrer Beziehungen verwendet. In Anlehnung an [Bal09] wird im Rahmen dieser Arbeit ein Architekturmodell definiert.

Definition 4.3: Ein *Architekturmodell* beschreibt die modellhafte Softwarestruktur auf den oberen Abstraktionsebenen durch die logische Gliederung in Komponenten, Schnittstellen sowie Beziehungen zwischen diesen. Das Architekturmodell abstrahiert und verbirgt Details.

In dieser Hinsicht wird bereits durch die Einteilung in Komponenten (Abschnitt 4.3.1) eine erste logische Ordnung vorgenommen, die nach [Bal11] als Ausgangspunkt für die Bildung von Subsystemen, hierarchische Verfeinerung und Verknüpfung mit der softwaretechnischen Infrastruktur (Abschnitt 4.3.1) dient.

Sowohl in [Bal09] als auch in [Bal11] werden wesentliche *Prinzipien* zur Gestaltung eines Architekturmodells genannt, z.B. Abstraktion, Hierarchisierung, Bindung und Kopplung, Ökonomie oder Symmetrie. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Architekturprinzip *Trennung von Zuständigkeiten* (separation of concerns) angewendet. Durch dieses wird eine logische Aufgabe direkt einer funktionalen Komponente zugeordnet, wodurch klar abgegrenzte Zuständigkeiten und Schnittstellen entstehen. Das erleichtert das Übertragen konzeptioneller Aufgaben auf ihre softwaretechnische Repräsentanz. Zur zusätzlichen Strukturierung des Architekturmodells werden *Architekturmuster* eingesetzt.

Definition 4.4: *Architekturmuster* (architecture pattern) beschreiben Systemstrukturen, die die Gesamtarchitektur eines Systems festlegen. Sie spezifizieren, wie Subsysteme zusammenarbeiten. ([Bal11], S. 37)

Architekturmuster sind somit schematische bzw. wiederkehrende Lösungsansätze zur inneren und äußeren Strukturierung eines Softwaresystems. Als Basismuster für die Entwicklung des Architekturmodells zur kognitiven Automatisierung wird das *Schichten-Muster* (layered pattern) angewendet. Dadurch wird das gewählte Architekturprinzip umgesetzt und somit eine weitere Einordnung und Trennung der Komponenten des Architekturmodells in hierarchische Schichten vorgenommen, die den jeweils übergeordneten Schichten klar definierte *Dienste* (services) mit Zugriffsrechten bzw. Schnittstellen zu Verfügung stellt. Innerhalb einer Schicht sind die Beziehungen frei gestaltbar. Bekannte Beispiele für schichtenbasierte Architekturmodelle sind das *ISO Open-Systems-Interconnection-Referenzmodell* für die Kommunikation in Netzwerken [ISO96] sowie die *service-orientierte Architektur* (service-oriented architecture) zur Strukturierung von verteilten Systemen [OAS12].

Die folgenden Abschnitte konkretisieren nach dem in [Bal11] vorgeschlagenen Verfahren zum Architekturentwurf die Trennung der Zuständigkeiten und ihre Abbildung in einer softwaretechnischen Infrastruktur.

Logische Systeme und Komponenten des Architekturmodells

In den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 wurden bereits die Prozessschritte der kognitiven Informationsassistentz erarbeitet: Erfassung, Analyse, Entscheidung, Planung, Datenspeicherung und Bereitstellung sowie Modellbildung, Modellanwendung und Modellevaluation. Aus diesen werden folgend dem Architekturprinzip zur *Trennung der Zuständigkeiten* die technologischen Subsysteme zur Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse des Werkers abgeleitet.

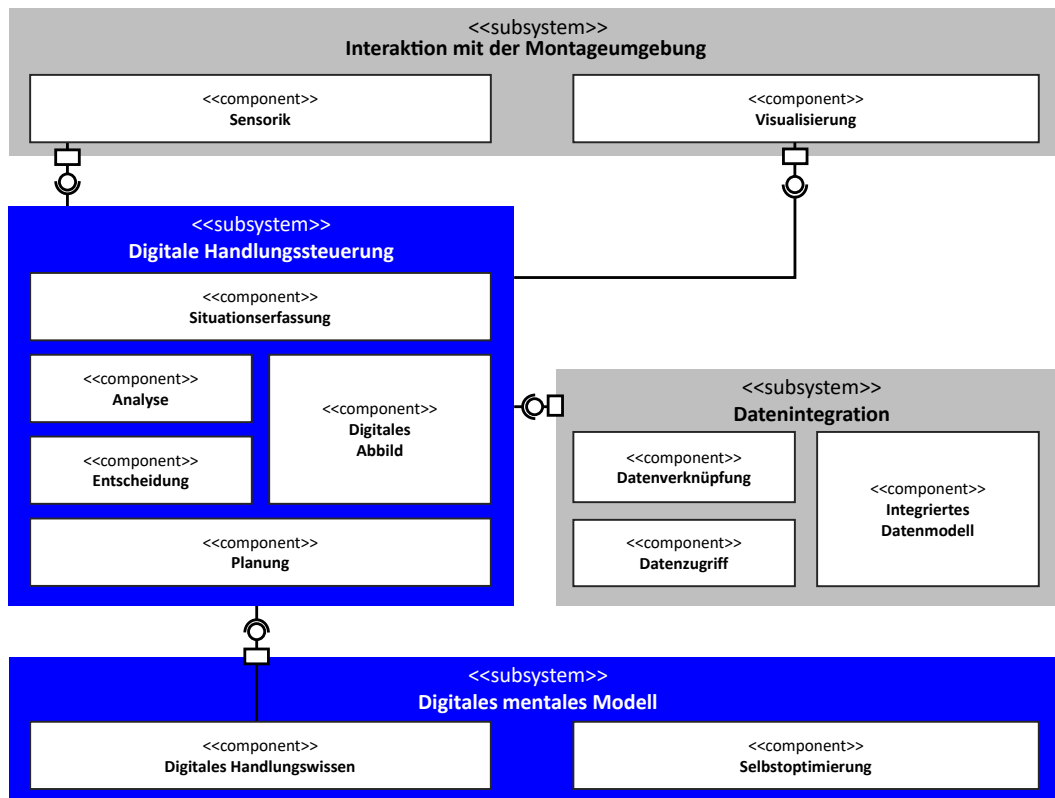


Abbildung 4.11.: UML 2.0 Komponentendiagramm mit Ordnung in Subsystemen und Komponenten. Die blau hervorgehobenen Subsysteme *Digitale Handlungssteuerung* sowie *Digitales mentales Modell* verweisen auf den technologischen Fokus der vorliegenden Arbeit.

Diese vier Subsysteme bilden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Basisarchitektur der kognitiven Informationsassistentz:

1. **Interaktion mit der Montageumgebung:** In diesem Subsystem werden die Komponenten für die Erfassung des Informationszustandes der Montageumgebung (*Sensorik*) und für die *Visualisierung* von Informationen in der Montageumgebung zusammengefasst. Damit ist sie die primäre Schnittstelle des kognitiven Informationsassistentzsystems zur Montageumgebung bzw. zum

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

Werker.

2. **Digitale Handlungssteuerung:** Dieses Subsystem umfasst Komponenten zur *Situationserfassung* und Erstellung eines *digitalen Abbildes* auf dessen Basis die *Analyse*, *Entscheidung* und *Planung* einer Handlungsstrategie für den Werker ebenfalls in separaten Komponenten erfolgt.
3. **Datenintegration:** Dieses Subsystem übernimmt die datentechnische Integration des kognitiven Informationsassistentzsystems in die vorhandene technologische Infrastruktur am Montagearbeitsplatz und damit in die Systeme ERP, MES, ECMS und PLM. Dafür werden Komponenten zur *Datenverknüpfung*, dem technischen *Datenzugriff* sowie die übergeordnete Strukturierung der heterogenen Datenquellen über ein *integriertes Datenmodell* eingesetzt.
4. **Digitales mentales Modell:** Dieses Subsystem setzt alle Prozesse der Modellbildung, Modellanwendung sowie Modellevaluation um, die zur Steuerung der kognitiven Informationsassistentz erforderlich sind. Sie enthält die Komponenten zur Bereitstellung des *Digitalen Handlungswissens* sowie zur *Selbstoptimierung*.

Damit ergibt sich die in Abbildung 4.11 dargestellte Ordnung als Grundlage des Architekturmodells zur kognitiven Automatisierung. Zwischen den Subsystemen werden Daten über bereitgestellte Schnittstellen ausgetauscht. Aus Sicht der Steuerung übernimmt das Subsystem Digitale Handlungssteuerung, die logische Verknüpfung mit den anderen Subsystemen.

Logische Schichten des Architekturmodells

In den vorangegangenen Abschnitten wurde durch das Architekturprinzip *Trennung der Zuständigkeiten* eine Abstraktion und Ordnung in Komponenten und Subsysteme vorgenommen. Für die Ableitung eines Architekturmodells wird nun eine weitere Strukturierung durch die Einführung des *Schichten-Musters* vorgenommen.

Hierfür wird die Schichteneinteilung für service-orientierte Architekturen [OAS12] eingesetzt. Sie eignet sich insbesondere für modulare, verteilte Systeme und unterscheidet fünf Schichten:

1. **Consumer Layer:** In dieser Schicht befindet sich die Benutzungs- und Interaktionsschnittstelle zum Menschen. Durch sie werden Informationen aufgenommen und bereitgestellt.
2. **Business Process Layer:** Die logische Ausführung der Geschäftsprozesse erfolgt in dieser Schicht. Sie verknüpft bzw. orchestriert die dafür erforderlichen Dienste in der entsprechenden Reihenfolge und Integrationstiefe.
3. **Service Layer:** In dieser Schicht erfolgt die Bereitstellung der logischen Dienste zur Unterstützung des Geschäftsprozesses.

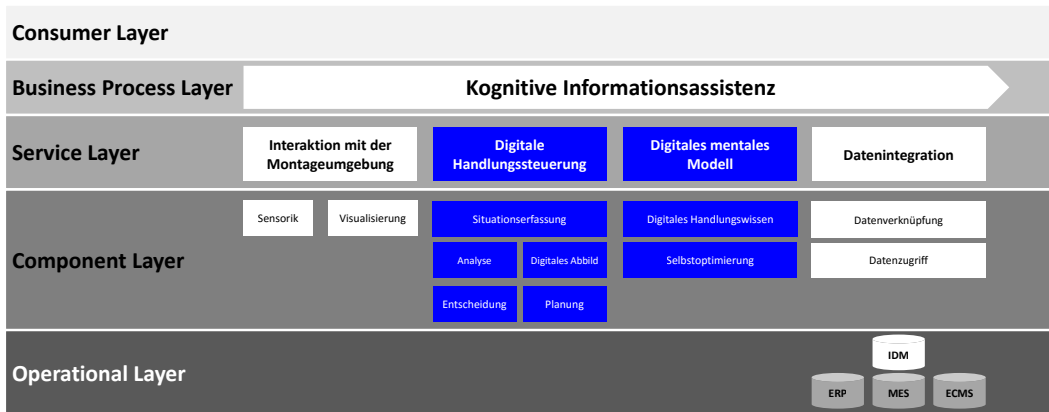


Abbildung 4.12.: Strukturierung des Architekturmodells durch das SOA-Schichten-Muster (vgl. [OAS12])

4. **Component Layer**: Die logischen Komponenten zur Zusammensetzung der Dienste liegen in dieser Schicht. Es handelt sich hierbei um funktionale Bibliotheken oder Module.
5. **Operational Layer**: In dieser Schicht werden alle zur Ausführung erforderlichen operativen Datenmodelle, Softwaresysteme und insbesondere Datenmanagementsysteme zusammengefasst.

Gemäß dieser Schichteneinteilung werden die zuvor als Subsystem zusammengefassten Komponenten als Dienste im Service Layer und die einzelnen Komponenten im Component Layer abstrahiert. Die zugehörigen Modelle werden dem Operational Layer zugeordnet. Daraus ergibt sich die in Abbildung 4.12 dargestellte Strukturierung durch das SOA-Schichten-Muster nach [OAS12].

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich nun mit der technologischen Konkretisierung der im Architekturmodell enthaltenen Subsysteme. Der Fokus liegt hierbei in der Erörterung der technologischen Basiskonzepte des *digitalen mentalen Modells* in Abschnitt 4.3.3 sowie zur *digitalen Handlungssteuerung* in Abschnitt 4.3.4. Die Subsysteme *Interaktion mit der Montageumgebung* (siehe Abschnitt 4.3.2 und *Datenintegration* (siehe Abschnitt 4.3.5) werden stark zusammengefasst betrachtet. Sie sind für eine gesamt-technologische Betrachtung erforderlich, liegen jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

4.3.2. Interaktion mit der Montageumgebung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Analyse der Rahmenbedingungen sowie des Einsatzszenarios in der manuellen Montage vorgenommen. Die Ergebnisse der kognitiven Arbeitsanalyse in Abschnitt 3.5 geben dort über das unmittelbare Wirkungsumfeld des Werkers Aufschluss. Veränderungen des Zustandes dieses Wirkungsumfeldes müssen durch das Informationssystem erfasst und eingeordnet

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

werden um anschließend eine dieser Veränderung angemessene Reaktion zu zeigen. Das Wirkungsumfeld wird dabei als *Kontext* des Assistenzsystems verstanden und nach [DA99] definiert als:

Definition 4.5: *Kontext* ist die Menge aller Informationen, die zur Beschreibung des Informationszustandes der Montageumgebung und für die Interaktion zwischen Menschen und kognitivem Informationsassistenzsystem erforderlich sind. Der Kontext unterteilt sich in Entitäten, welche die Zustände und Eigenschaften der relevanten Personen, Orte, Objekte und Prozesse informationstechnisch abbilden.

Für die technologische Erfassung des Kontextes ist der Einsatz von Sensoren erforderlich. Diese müssen den informationstechnischen Zustand des Werkers, seiner räumlichen Umgebung sowie der relevanten Objekte bzw. Prozesse und damit ihrer Eigenschaften aufzeichnen.

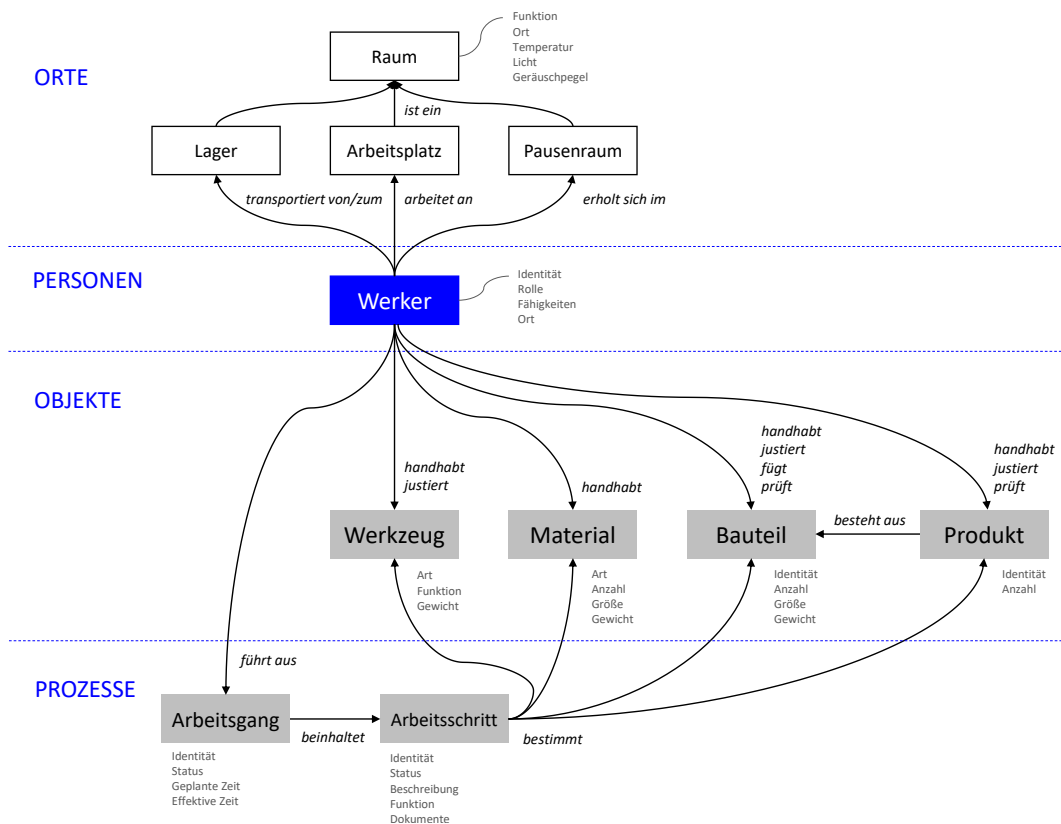


Abbildung 4.13.: Unterteilung des Kontextes in Orte, Personen, Objekte sowie Prozesse

In [AGU14] wurde zunächst eine entsprechende Unterteilung des Kontextes in Orte, Personen und Objekte vorgenommen. Diese wird jedoch im Rahmen der Arbeit um den Aspekt der Prozesse ergänzt, um damit den besonderen Stellenwert der Prozesse als wesentliches Strukturierungsmerkmal der Montage herauszuarbeiten.

Die so vorgenommene Unterteilung ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Die zu erfassende Person ist der Werker. Als Orte kommen der unmittelbare Arbeitsplatz, das Lager sowie ein Pausenraum in Betracht. Schließlich entsprechen die zu erfassenden Objekte den bereits in Abschnitt 3.5 identifizierten Objekten mit ihren Eigenschaften. Als Prozesse kommen der zu unterstützende Arbeitsgang und seine unmittelbare Unterteilung in Arbeitsschritte vor. Die Beziehungen und Interaktionen zwischen dem Werker sowie den Orten, Prozessen und Objekten sind anhand der Pfeile erkennbar und entsprechen den identifizierten Handlungen aus Abschnitt 3.5.

Sensorik

Durch die technologische Erfassung der Objekteigenschaften bzw. ihrer Veränderungen und durch die Beobachtung der ausgeführten Handlungen des Werkers ist die Schlussfolgerung der aktuellen Arbeitssituation möglich, zum Beispiel durch Auswertung der Bauteillage, Werkzeugnutzung und der Montagetätigkeit. Hier lassen sich unterschiedliche technologische Ansätze zur Erfassung mittels Sensoriken anwenden:

1. **Bildbasierte Sensorik:** Durch den Einsatz von 2D- bzw. 3D-Verfahren der Bilderkennung lassen sich in Abhängigkeit von den eingesetzten Sensoren (Single-, Stereo- oder Multi-Kameras, Time of Flight, Structured Light) Aussagen über Körper- und Objektveränderungen treffen. Hierfür wird ein Tracking der relevanten Objekte bzw. des Werkers erforderlich, um deren Position im Raum kontinuierlich zu bestimmen [YJS06]. Dem schließen sich genauere Erfassungstechniken zur Bestimmung der Raumlage und Veränderung des Objektes an. So können zum Beispiel Ansätze zur genaueren Bestimmung der Orientierung und Pose des menschlichen Gesichtes in [GI07], zur Erkennung von Körpergesten in [GSP11] und zur Verfolgung von Hautpartien in [Gut+11] gefunden werden. Hier lassen sich jedoch selten durchgehend stabile Verfahren zur bildbasierten Erfassung aller Körperpartien des Menschen finden. Der Fokus liegt darum vielfach in der Verfolgung der Hand [Ank+13; Gut+11] bzw. des Kopfes [MCT09].
2. **Alternative Sensorik:** Als Alternative zu den bildbasierten Sensoren bieten sich andere Sensortypen an, welche ebenfalls Auskunft über Veränderungen der Objekte oder des Werkers geben können. In [Liu+15] wurde die Auswertung von Veränderungen in den Feldern von Funknetzen genutzt, um die Atmung, Position und Raumlage von Menschen zu bestimmen. Durch den Einsatz von Beschleunigungssensoren lassen sich ebenso Informationen über die Bewegung und Veränderung der Raumlage von Objekten und Menschen gewinnen. In [Bie+11] und [BKU12] wurden so kontinuierliche Bewegungsmuster des Menschen klassifiziert. In [Hei+12] wurde durch die Erfassung und Auswertung des Bewegungsmusters der menschlichen Hand die Unterscheidung rudimentärer Gesten und Arbeitsoperationen (z.B. Schrauben) verfolgt.

Durch die teilweise unternehmensabhängigen und strengen Sicherheitsvorschriften während der Montage ist die Instrumentierung des Werkers selbst mit Sensoren nur

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

bedingt möglich. So kann zum Beispiel das Tragen von Schmuck, Armbändern oder Uhren verboten sein, wodurch der Einsatz von am Körper getragenen Sensoren nicht möglich ist. Daher ist eine Instrumentierung der Arbeitsumgebung als Alternative vorzuziehen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden darum Untersuchungen vorgenommen, durch die sensorische Erfassung der Arbeitsumgebung, Aussagen über die aktuelle Arbeits- bzw. Montagesituation zu erhalten (siehe [AB16; AB15a; AB15b; BA14; AB14; Aeh+13]). Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass durch die sensorische Erfassung von Bauteilen, Materialien und Werkzeugen bereits ausreichend Informationen zur Bestimmung des Kontextes vorhanden sind. Damit können Aussagen über die Interaktion des Werkers mit seiner Arbeitsumgebung getroffen werden.

Visualisierung

Ein zweiter Aspekt zur technologischen Umsetzung der Komponente Interaktion mit der Umwelt ist die Visualisierung von Informationen im Arbeitsprozess des Werkers. Hier nimmt das kognitive Informationsassistentzsystem Einfluss auf den Montagearbeitsplatz und verändert den dortigen Informationszustand (siehe Abschnitt 2.3.1).

Zur Unterstützung der gezielten Information des Werkers sowie zur Vermeidung einer Informationsüberlastung, wird die visuelle Benutzungsschnittstelle des kognitiven Informationsassistentzsystems in mehrere Ebenen unterteilt. Diese sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Auf der obersten Ebene werden dem Werker Informationen zu geplanten Arbeitsgängen visualisiert. Auf der nächsten Ebene wird eine Zusammenfassung der wesentlichen Details zu einem gewählten Arbeitsgang bereitgestellt. Es muss die Anzahl der Arbeitsschritte sowie Informationen zu dem zu verwendenden Material, Werkzeugen und Bauteilen visualisiert werden. Eine bildliche Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte unterstützt das kognitive Assoziieren und Planen des Arbeitsganges durch den Werker.

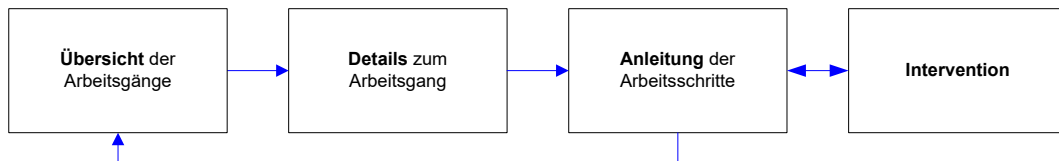


Abbildung 4.14.: Visuelle Informationsebenen des kognitiven Informationsassistentzsystems

Beginnt der Werker mit der Arbeit an einem Arbeitsgang, so visualisiert das kognitive Informationsassistentzsystem jeden einzelnen Arbeitsschritt. Dabei werden die in Abschnitt 4.2 erarbeiteten Methoden zur kognitiven Informationsassistentz umgesetzt. Demzufolge gehören zur Visualisierung folgende Aspekte:

- **Navigation und Orientierung:** Informationen zur Struktur und Reihenfolge des Arbeitsganges vereinfachen das Erinnern und Verstehen sowie das Analysieren und Bewerten des Arbeitsprozesses durch den Werker Handlungsoptionen,

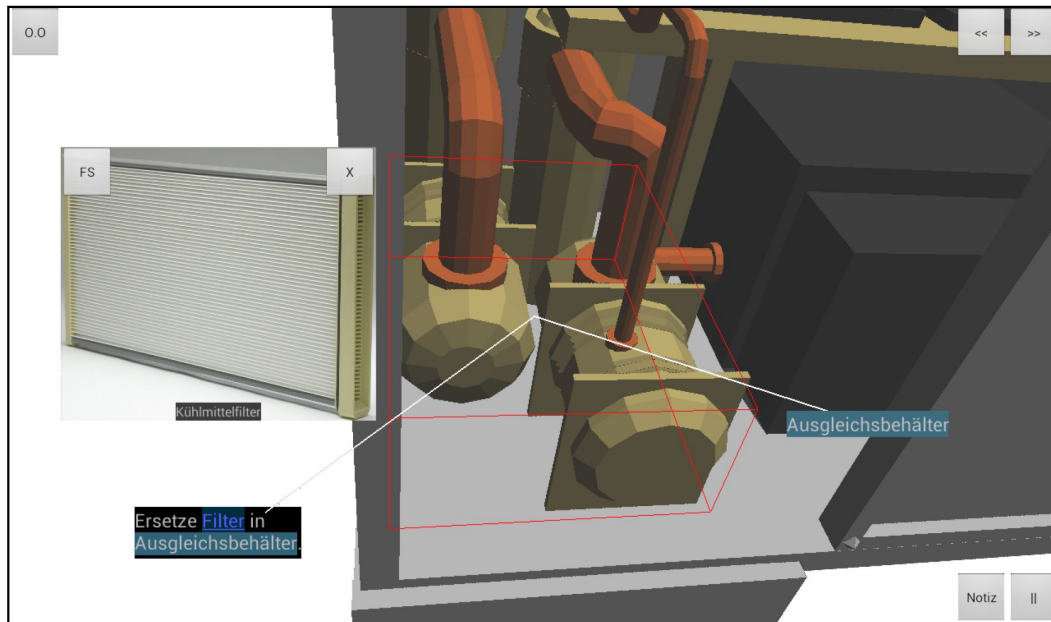


Abbildung 4.15.: Visualisierung und automatisierte Annotation des aktuellen Arbeitsschrittes auf der Basis des 3D-Konstruktionsmodells (Quelle: [Krü13])

wie zum Beispiel die Auswahl eines Arbeitsschrittes oder die Entnahme von Material, müssen erkennbar sein.

- **Anleitung:** Durch die schrittweise Anleitung des Montageprozesses wird einerseits das Vorgehen durch das kognitive Informationsassistentzsystem modelliert. Der Werker kann dieses Vorgehen adaptieren, dann folgt er den Vorschlägen des kognitiven Informationsassistentzsystems oder er schlägt eine eigene Montagereihenfolge vor. Dann folgt das kognitive Informationsassistentzsystem dem Werker und interveniert nur bei bevorstehenden Problemen. Für die Anleitung müssen dem Werker eindeutige Arbeitsanweisungen, ergänzende Erklärungstexte sowie Dokumente (Zeichnungen, 3D-Modelle, Bilder) oder Anmerkungen bereitgestellt werden. Die sehr kleinschrittige Anleitung des Werkers reduziert so die kognitive Belastung während der Montage.
- **Intervention:** Wenn das kognitive Informationsassistentzsystem ein Problem bei der Ausführung feststellt, muss es durch einen entsprechenden visuellen Hinweis intervenieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit einer verteilten Visualisierung der Informationen experimentiert [AU14; Nes14; Kle13]. Abhängig von der Informationsdichte und der Größe verfügbarer Displays wurde so die Anleitungskomponente weiter untergliedert und Teilinformationen auf mobilen Displays, wie zum Beispiel

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

Smartwatches dargestellt. Dadurch konnte die unmittelbare Arbeitsanweisung direkt während der Durchführung der Montage Tätigkeit am Handgelenk aktualisiert werden. Komplexere Informationen, wie zum Beispiel 3D-Konstruktionsmodelle, wurden so auf größeren Displays in der Nähe angezeigt. In [Krü13] wurde gezeigt, wie diese 3D-Informationen durch eine arbeitgang-angepasste Orientierung des Blickwinkels sowie der Anmerkungen auf die Montagesituation adaptiert werden können (siehe Abbildung 4.15).

4.3.3. Modellierung von Handlungswissen im digitalen mentalen Modell

Bereits in den Abschnitten 3.3 und 3.6 wurde das Handlungs- und Erfahrungswissen eines Werkers als Quelle für die Analyse, für Entscheidungen sowie die Planung bzgl. des manuellen Montageprozesses identifiziert. Ein Informationsassistentzsystem zur kognitiven Automatisierung der Montage muss über ein analoges Wissen verfügen, um damit die aktuelle Montagesituation korrekt zu antizipieren, Handlungsoptionen abzuwägen und schließlich den nächsten Handlungsschritt des Werkers durch eine gezielte Informationsbereitstellung vorzubereiten und zu unterstützen (siehe Abschnitt 4.2). Hierzu kann das Assistentzsystem auf Daten und Informationen aus den vorhandenen informationsverarbeitenden Technologien in der Montage zugreifen (vgl. Abschnitt 3.4), so zum Beispiel auf:

- **Spezifikationen**, welche die kundenspezifischen Anforderungen und Ausführungsvorgaben detaillieren,
- **Montagemodelle**, welche die geometrischen und materialtechnischen Eigenschaften der zu montierenden Artikel visualisieren,
- **Stücklisten**, welche die Montagehierarchie sowie Artikel-Auslegung der Komponenten aufschlüsseln und einem
- **Arbeitsplan**, der die arbeitsplatzbezogene Zerlegung des Montageprozesses in Arbeitsgänge mit der dazugehörigen Ressourcenzuordnung vornimmt.

Zusätzlich benötigt das Assistentzsystem jedoch weiteres Handlungswissen, welches bisher in keinem technologischen Informationssystem abgebildet wird. Dieses Wissen umfasst Informationen zur:

- **Montagesemantik**, welche die Konzepte, Beziehungen und Zusammenhänge der Montage modelliert, sowie zur
- **Montagesequenz**, welche die kleinschrittige Folge von Arbeitsschritten zur Durchführung eines Arbeitsganges beschreibt.

In den folgenden beiden Abschnitten wird ein Konzept zur Ableitung bzw. Modellierung dieser beiden Wissensaspekte entwickelt.

Modellierung der Montagesemantik

Die Montagesemantik beschreibt Konzepte, ihre Beziehungen und Zusammenhänge der Montage, um damit ein maschinelles Verstehen von Montagesituationen, die Entscheidung zur Informationsunterstützung des Menschen und das situationsangemessene Planen der Informationsbereitstellung zu ermöglichen. Als wesentliche Konzepte zählen in diesem Zusammenhang alle Personen, Dinge und Prozesse, die innerhalb des Arbeitsganges einen Einfluss auf das Montageergebnis ausüben, zum Beispiel Werkzeuge, Bauteile, Hilfsmittel, Fügeoperationen oder Qualitätsstandards. Durch Beziehungen zwischen diesen Konzepten werden Abhängigkeiten ausgedrückt. So erfordert das Ausführen einer Fügeoperation Schrauben die Verwendung eines Werkzeuges (Schrauber) und das passende Material (Schrauben und Muttern). Durch die Analyse der Konzepte und ihrer Beziehungen untereinander werden Zusammenhänge erkennbar, die eine höhere Semantik ausdrücken. Die Fügeoperation Schrauben kann zum Beispiel bei unterschiedlichen Materialarten unterschiedliche Drehzahleinstellungen erfordern.

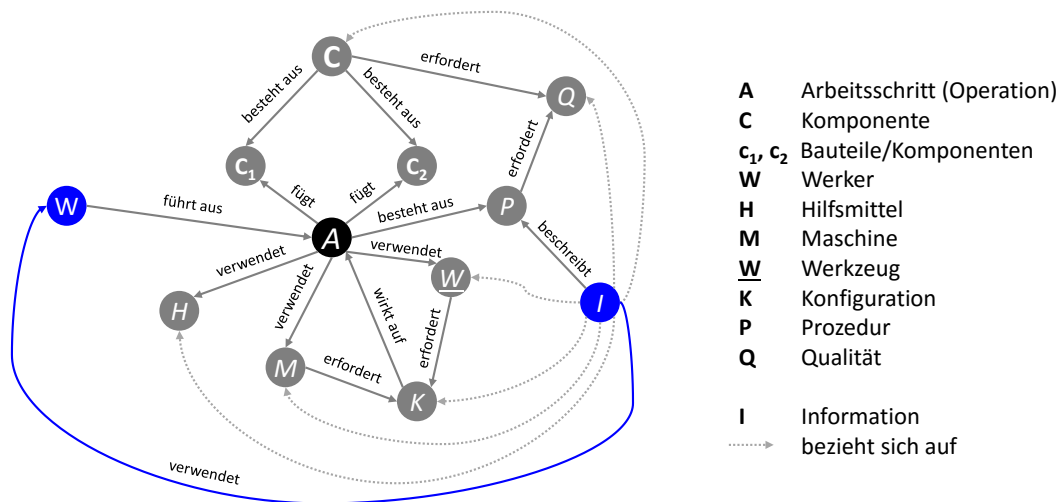


Abbildung 4.16.: Ausschnitt aus dem Modell der Montagesemantik für die Ausführung eines Arbeitsschrittes (A)

In Abbildung 4.16 wird ein exemplarischer Ausschnitt der Montagesemantik zur Beschreibung der Konzepte, Beziehungen und Zusammenhänge für das Ausführen eines Arbeitsschrittes veranschaulicht. Dieser Ausschnitt ist hier weitestgehend abstrakt gehalten. Es lässt sich jedoch für jeden Arbeitsschritt ein eigenes Modell konstruieren, um so auch die Unterschiede und Spezifika der einzelnen Füge-, Hilfs- oder Sonderoperationen angemessen zu modellieren.

In dem Modell wird die indirekte Beziehung zwischen dem Arbeitsschritt (A) und der bereitgestellten Information (I) für den Werker deutlich. Die Information beschreibt letztlich die Prozedur (P) und bezieht sich dabei auf die jeweils relevanten anderen Konzepte.

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

Als Grundlage für die Modellierung der Montagesemantik dienen die Ergebnisse der Analyse des Wirkungsumfeldes aus Abschnitt 3.5, die Bauvorschriften der zu montierenden Anlage (Spezifikationen, Montagemodell, Stückliste, Arbeitsplan) aus den Produktionssystemen ERP, PLM und ECM, Handlungswissen sowie Normen und Richtlinien zur Ausführung der Montage (z.B. VDI 2860:1990-05 [Ger90]). Sie sind in ein formalisiertes, maschinell interpretierbares Modell zu überführen, was so die automatisierte Interpretation und Verarbeitung durch das kognitive Informationsassistentzsystem ermöglicht.

Im folgenden Abschnitt soll nun näher auf die Modellierung der Montagesequenz eingegangen werden, die im obigen Modell als Abfolge aller Prozeduren der auszuführenden Füge-, Hilfs- und Sonderoperationen zu verstehen ist.

Modellierung der Montagesequenz

Die Montage einer komplexen Anlage besteht aus umfangreichen Arbeitsschritten zur Vor-, Zwischen- und Endmontage von Bauteilen bzw. modularen Komponenten (siehe Kapitel 3). Eine effiziente Abfolge dieser Arbeitsschritte bewirkt den zeit- und kostensparenden Einsatz von Ressourcen. Aus diesem Grund wird zur Modellierung der Montagesequenz als Grundlage für die Anleitung des Werkers zunächst die Effizienz der Montage betrachtet.

Gemäß Lotter & Wiendahl zeichnet sich eine effiziente Montage durch ein wirtschaftliches Verhältnis von Arbeitsschritten der Primärmontage (PM) und Arbeitsschritten der Sekundärmontage (SM) aus [LW12]. Dabei wird die Dauer der Arbeitsschritte als Bemessungskriterium eingesetzt. Somit lässt sich nach Lotter & Wiendahl der Wirkungsgrad W_M der Montage in folgender Formel ausdrücken:

$$W_M = \frac{\sum PM}{\sum PM + \sum SM} * 100[\%] \quad (4.1)$$

Steigt der zeitliche Anteil der Arbeitsschritte für die Sekundärmontage, wie zum Beispiel für das Ablegen oder Weitertransportieren von Bauteilen, so sinkt der Wirkungsgrad und damit die Effizienz der Montage. Aus diesem Grund muss die Abfolge der Arbeitsschritte zur Ausführung eines Arbeitsganges in der Montage, die Montagesequenz, einen minimalen Anteil an Sekundärmontagevorgängen aufweisen, also $\sum SM \rightarrow Min$.

Ausgehend von dem in letzten Abschnitt entwickelten Modell für die Montagesemantik (siehe Abbildung 4.16) lässt sich die Montagesequenz als Zerlegung aller auszuführenden Arbeitsschritte der Montage in ihre sequentielle Prozedurabfolge verstehen. Zur Zerlegung der Arbeitsschritte und Ermittlung einer gültigen Montagesequenz lassen sich nun folgende Strukturprinzipien anwenden:

- **Hierarchien und Sequenzen:** Komplexe Anlagen bestehen aus einem modulartigen Aufbau. Durch die Vor- und die Zwischenmontage werden darum zunächst die Bauteile sowie Komponenten niedriger Ordnung zu Komponenten höherer Ordnung gefügt, bevor in der Endmontage der Einbau in die Anlage er-

folgt. Diese logische Strukturierung ist sowohl im ERP in der Reihenfolge der Arbeitsgänge (Sequenz) sowie in der hierarchischen Fertigungsstücklistenstruktur (Hierarchie) als auch im CAD-Montagemodell (Hierarchie) vorgegeben.

- **Geometrien und Ergonomie:** Die Montage der Komponenten einer Anlage erfolgt in der Regel räumlich beschränkt. Durch die Geometrie der Komponenten sowie die Ergonomie des Arbeitsplatzes bezogen auf die auszuführende Fügeoperation ist darum eine optimale Sequenz zu wählen, die den Montage-raum jeweils maximiert und dabei eine ergonomische Arbeitsweise (z.B. von hinten nach vorn) ermöglicht.
- **Verfahrenstechnik:** Durch vorgegebenen verfahrenstechnischen Abläufe in der Montage oder die Unterteilung in Teilbereiche (z.B. Gehäusemontage, Elektromontage) ist ein weiteres Strukturierungsprinzip gegeben, das zur Ermittlung der Montagesequenz eingesetzt werden kann. Hierbei werden die verfahrenstechnischen Abläufe für die Sequenzierung der Arbeitsgänge und damit der Arbeitsschritte herangezogen.
- **Wirtschaftlichkeit:** Die Minimierung von Rüstzeiten zwischen einzelnen Arbeitsschritten ist genauso wie die Reduzierung von Sekundärmontagevorgängen ein Kriterium, um zeit- und kostensparend zu arbeiten. Aus diesem Grund muss die Montagesequenz den Wechsel von Arbeitsplätzen und Werkzeugen so gering wie möglich halten. Arbeitsschritte die ohne Werkzeugwechsel nacheinander ausführbar sind (z.B. das Bohren aller Montagelöcher) sind damit der Einzelausführung (z.B. Bohren und Schrauben für jedes Montageloch einzeln) vorzuziehen. Gleiches gilt unter anderem für den Verbrauch von Hilfsmitteln während der Montage. Auch hier kann die Montagesequenz bzgl. einem sparsamen Einsatz von Hilfsmitteln optimiert werden.

Mit Hilfe dieser Strukturprinzipien lässt sich eine gültige Montagesequenz ermitteln. Dazu wird ein rekursives Verfahren vorgeschlagen, welches entlang der hierarchischen Struktur der zu montierenden Anlage zunächst die Arbeitsschritte zur Vor- und Zwischenmontage der Komponenten und anschließend ihrer Endmontage zerlegt.

```

1 def Ermittle_Montagesequenz(Komponente C):
2     Montagesequenz S = {}
3     for Komponente Ci in C:
4         Montagesequenz Si = Ermittle_Montagesequenz(Ci)
5         S += Si
6     S += Montageprozedur(C)
7     return Optimierte(S)

```

Listing 4.1: Algorithmus in Pseudocodeform zur Ermittlung einer Montagesequenz

Der Algorithmus 4.1 veranschaulicht dieses Verfahren als Pseudocode. Die Optimierung der ermittelten Montagesequenz, zum Beispiel hinsichtlich des Wirkungsgrades bzw. der Wirtschaftlichkeit, wird an jedem Knotenpunkt der Montagehierarchie vorgenommen. Dazu ist ein Arbeitsschritt als Übergang von einem Zustand z_i auf einen

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

folgenden Zustand z_{i+1} durch die Anwendung einer Prozedur p zu betrachten, der Kosten bzgl. der Zeit, des Verbrauchs, der Veränderungen im Modell usw. verursacht. Es lässt sich demzufolge ein Kostenvektor $K(z_i, z_{i+1})$ definieren:

$$z_i \xrightarrow{K(z_i, z_{i+1})} z_{i+1}, \quad K(z_i, z_{i+1}) = \begin{bmatrix} t_{\text{Sekundaermontage}} \\ \Delta_{\text{Montagemodell}} \\ \Delta_{\text{Montagestruktur}} \\ \dots \\ t_{\text{Ruestzeit}} \\ \sum \text{Verbrauchsmittel} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Der Kostenvektor bildet dabei alle Merkmale ab, nach denen die Effizienz des Arbeitsschrittes für den jeweils aktuellen Zustand bewertet werden kann, z.B. die Zeitdauer der Sekundärmontagevorgänge ($t_{\text{Sekundaermontage}}$), den geometrischen Abstand der verbauten Komponenten im Montagemodell ($\Delta_{\text{Montagemodell}}$), ihren Abstand in der Montagehierarchie ($\Delta_{\text{Montagestruktur}}$) oder die Rüstzeit zwischen den Fügevorgängen ($t_{\text{Ruestzeit}}$). Auf diese Weise können die zuvor eingeführten Strukturprinzipien in Merkmale des Kostenvektors überführt werden, die zur Auswahl einer optimalen Montagesequenz eingesetzt werden. Ziel ist es hierbei eine Sequenz aus Prozeduren zu finden, die zu kosteneffektiven Zustandsübergängen führen (siehe Algorithmus 4.2). Das so optimierte Ergebnis bildet die Grundlage zur Informationsbereitstellung des Assistenzsystems.

```

1 def Optimierte(Montagesequenz S):
2     Montagesequenz S' = {}
3     Zustand z = Aktueller_Zustand()
4     for int i in range [0, length(S)]:
5         Kosten K = MAX
6         Prozedur P = {}
7         for Prozedur p in S]:
8             if (Kosten(z, p) < K): P = p
9         S' += P
10        S -= P
11        z = Simuliere(z, p)
12    return S'
```

Listing 4.2: Algorithmus in Pseudocodeform zur Optimierung einer Montagesequenz, die auf den aktuellen Montagezustand angewendet werden soll. Die Prozeduren werden zunächst nur simuliert und es werden ihre Kosten berechnet, um eine optimierte Montagesequenz zu erhalten.

Die ermittelten Montagesequenzen sind jedoch nicht eindeutig. Es kann alternative Pfade geben, die dennoch zu einem gültigen Montageergebnis führen. Hier ist es die Aufgabe des kognitiven Informationsassistentzsystems eine effiziente Montagesequenz zu ermitteln und entsprechende Informationen dem Werker zur Verfügung zu stellen sowie bei situativen Änderungen, zum Beispiel durch die Abweichung des Werkers vom Vorschlag, umzuplanen bzw. zu intervenieren. Hierbei hilft wieder das bereits vorgestellte rekursive Verfahren zur Ermittlung einer Montagesequenz. Es kann an jedem Knotenpunkt in der Montagehierarchie zur Neuplanung eingesetzt werden. In

den späteren Abschnitten wird die technologische Konkretisierung dieses Verfahrens erläutert.

Die formale Modellierung einer Montagesequenz S erfolgt als geordnete Menge, die eine Teilmenge aller Prozeduren P darstellt:

$$S = (p_1, \dots, p_n) \quad \forall p_i \in P : p_i \text{ ist Vorgänger von } p_{i+1} \quad (4.3)$$

Eine Prozedur p_i ist dabei ein Tupel (b, h, e) in welchem b eine Bedingung, h eine auszuführende Handlung und e das Ergebnis dieser Handlung darstellt. Die informelle Beschreibung dieser drei Aspekte für den Werker ist die Hauptaufgabe der Informationsbereitstellung durch das Assistenzsystem. Dieses konzentriert sich dadurch auf die kognitive Anleitung und Kontrolle der vorgeschlagenen Montagesequenz. Dabei beziehen sich die bereitgestellten Informationen auf die Konzepte der Montagesemantik die zum Verstehen und korrekten Ausführen der Prozeduren durch den Werker relevant sind. Die Informationen vermitteln damit das erforderliche Handlungswissen für die Montage durch die Vermittlung des Handlungswissens zu den einzelnen Prozeduren. In Abbildung 4.17 wird hier der Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Informationsquellen und den neu zu modellierenden Informationsaspekten Montagesemantik und Montagesequenz illustriert.

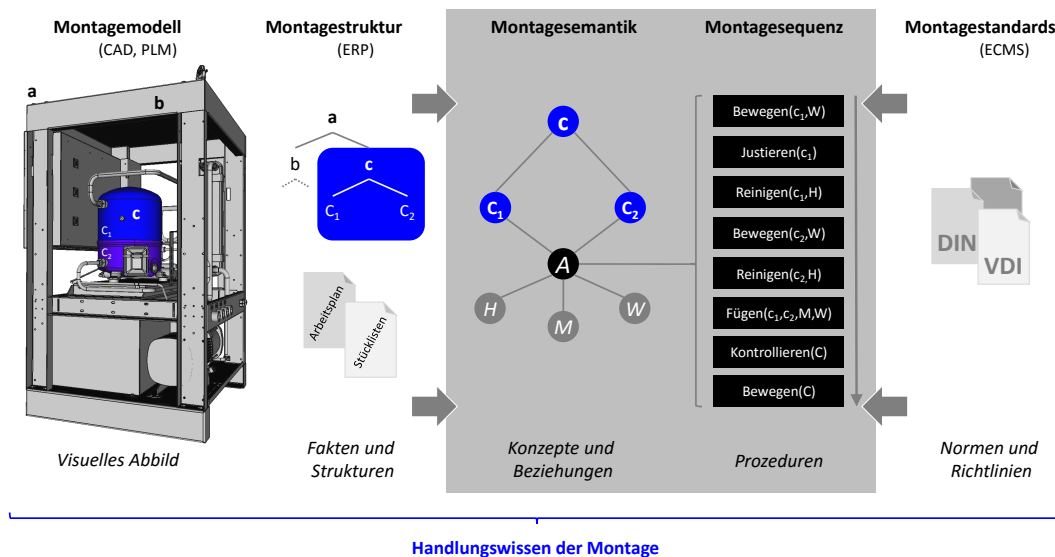


Abbildung 4.17.: Herkunft und Zusammensetzung des Handlungswissens für die Montage

Beide Informationsaspekte müssen als Bestandteil des Assistenzsystems zur kognitiven Automatisierung in der Montage betrachtet werden, da sie in keinem anderen technologischen Informationssystem bisher abgebildet und für die Automatisierung jedoch notwendig sind. Sie können in diesem Sinne direkt in das digitale mentale Modell (siehe Abschnitt 4.1.2) des Assistenzsystems abgebildet werden.

Im folgenden Abschnitt wird die digitale Handlungssteuerung als elementares

Subsystem der kognitiven Informationsassistenz erörtert.

4.3.4. Digitale Handlungssteuerung

In Abschnitt 4.1.1 wurde der Informationsprozess des kognitiven Informationsassistenzsystems in Anlehnung an das Modell der bewussten Handlungssteuerung nach [Ras83] sowie das in Abschnitt 3.6 entworfene Modell der kognitiven Entscheidungsleiter des Werkers entwickelt. Damit verarbeitet das kognitive Informationsassistenzsystem die Änderungen in der Montageumgebung in einer dem Menschen vergleichbaren Form. Ziel ist es hierbei durch das Prinzip der Team Cognition und damit durch ein verallgemeinertes und digitalisiertes mentales Modell der Arbeitsdomäne (siehe Abschnitt 4.2) sowie die Fähigkeit zum eigenständigen und gemeinsamen Lösen von aufgabenbezogenen Problemen die Zusammenarbeit mit dem Werker zu optimieren. Hierfür ist einerseits das bereits erarbeitete digitale mentale Modell als Quelle des Handlungswissens entscheidend. Andererseits erfordert die Automatisierung der situativ angepassten kognitiven Informationsassistenz eine digitale Handlungssteuerung, die:

- **Montagesituationen** und ihre Bedeutung für den Werker sowie den Montageprozess erfasst,
- **Handlungsmöglichkeiten** identifiziert, bewertet sowie entscheidet,
- eine angemessene **Prozedur** zur Umsetzung der Handlung plant,
- eine **Montageanleitung** zur Umsetzung der Prozedur als Information bereitstellt und im Fall eines Fehlers frühzeitig interveniert.

Aus technologischer Sicht sind für die Umsetzung dieser Anforderungen die bereits in Abschnitt 4.3.1 erarbeiteten Basiskomponenten erforderlich. Sie werden nun weiter detailliert.

Situationserfassung

Die Situationserfassung diskretisiert die aktuelle Montagesituation durch eine wiederkehrende Erfassung wesentlicher Eigenschaften der Montageumgebung mit Hilfe der bereits in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Sensorik. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit einem minimalistischen Ansatz zur Instrumentierung der Montageumgebung experimentiert und schließlich eine sensorische Erfassung über Eigenschaften (z.B. Anzahl, Verfügbarkeit oder Status) der verwendeten Werkzeuge und Maschinen, Materialien und Bauteile als hinreichend effektiv ermittelt [AB16; AB15a; AB15b; BA14; AB14].

Die so ermittelten Eigenschaften werden in einem digitalen Abbild der Montageumgebung gespeichert (siehe Abschnitt 4.3.4) und zur digitalen Handlungssteuerung durch Analysieren, Planen und Entscheiden verwendet (siehe Abschnitt 4.3.4).

Digitales Abbild

Das digitale Abbild repräsentiert den Informationszustand der Montageumgebung in einer automatisiert verarbeitbaren Form. Dazu werden die Elemente des Kontextmodells aus Abschnitt 4.3.2 in ein Datenmodell übertragen, welches durch die Komponente zur Situationserfassung für die Speicherung bzw. Aktualisierung des Informationszustandes auf Basis der erhaltenen Sensordaten genutzt wird. Damit wird das digitale Abbild idealerweise zu einem informationstechnisch äquivalenten Spiegelbild der realen Montageumgebung. Praktisch können jedoch nicht alle Eigenschaften und Veränderungen der Montageumgebung erfasst und damit abgebildet werden, da hier die sensorische Erfassung, Verarbeitung und Interpretation zu ungenau oder bisher nicht möglich ist (siehe Abschnitt 4.3.2).

In Abbildung 4.13 wurden bereits die relevanten Aspekte des Montagekontextes und ihre Eigenschaften illustriert. Diese wurden in Abschnitt 4.3.3 sowie durch die Abbildung 4.16 weiter für die Ausführung eines Arbeitsschrittes konkretisiert. Aus diesen Vorarbeiten leitet sich nun unmittelbar die Struktur des digitalen Abbildes ab (siehe Abbildung 4.18). Dieses konzentriert sich auf die am Montageort vorhandenen Objekte (Werkzeuge, Bauteile) und Prozesse (Arbeitsschritt, Prozedur) und deren Wechselwirkung. So wird insbesondere die Verwendung der Objekte im Rahmen der Prozesse als Abbildungsparadigma vorgeschlagen [AB16].

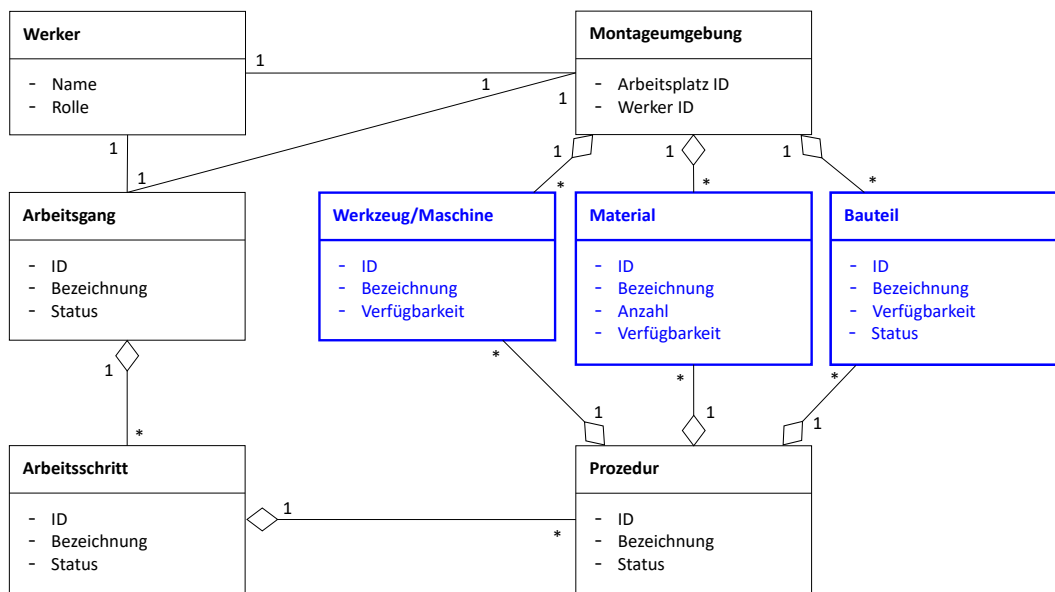


Abbildung 4.18.: Strukturierung des digitalen Abbildes zur Repräsentation des Informationszustandes der Montageumgebung

Im zentralen Fokus steht daher die Prozesshierarchie bestehend aus den Entitäten *Arbeitsgang*, *Arbeitsschritt* sowie *Prozedur*. Diese stellen eine mehrstufige Abbildung der in ERP bzw. MES vorhandenen Organisationsstrukturen für den Montageprozess dar. Auf der Prozedurebene wird schließlich über mehrere 1-n-Beziehungen die

4. Kognitive Informationsassistenz in der Montage

Beziehung der elementaren Prozeduren zu *Werkzeugen und Maschinen, Material* sowie *Bauteilen* hergestellt. Die Attributierung orientiert sich an wenigen Eigenschaften, die im Rahmen der digitalen Handlungssteuerung für die Analyse der Situation in der Montageumgebung verwendet werden sollen.

Der Werker wird in den weiteren Betrachtungen lediglich durch seinen Namen und eine Rolle identifiziert, die für eine Abstraktion der Zielstellungen und allgemeinen Erfahrungen bezogen auf den Arbeitsgang relevant sind. Hier ist es jedoch vorstellbar zukünftig den Tätigkeitskontext des Werkers stärker zu modellieren, um damit ausgeführte Handlungen explizit in das digitale Abbild aufzunehmen. Diese sind bisher implizit durch Veränderungen der Eigenschaften der Objekte am Arbeitsplatz modelliert.

Analysieren, Planen und Entscheiden

Das Modell der kognitiven Entscheidungsleiter zur regel- und wissensbasierten Handlungssteuerung des Werkers aus Abschnitt 3.6 bildet den Rahmen für die technologische Auslegung der Basiskomponenten zum Analysieren, Entscheiden und Planen. Die dort herausgearbeiteten Schritte zur Analyse der aktuellen Montagesituation, Entscheidung einer angemessenen Handlungsoption sowie Planung der Montagehandlung werden aus Sicht der kognitiven Informationsassistenz um einen weiteren Schritt ergänzt: die *Information*. In diesem Schritt wird das Ergebnis der vorherigen Schritte in einer situativ angemessenen Form an den Werker kommuniziert. Dies beinhaltet die Bereitstellung aller erforderlichen Informationen als Anleitung für den Werker.

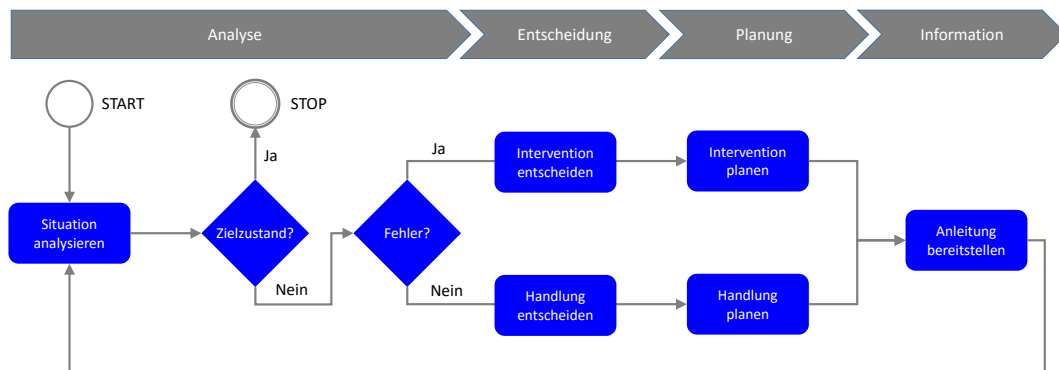


Abbildung 4.19.: Schritte der digitalen Handlungssteuerung zur Analyse einer Arbeitssituation sowie Entscheidung und Planung der Informationsbereitstellung in Anlehnung an die menschliche Handlungssteuerung in der manuellen Montage (siehe Abschnitt 3.6)

Im Einzelnen orientiert sich der technologische Ablauf der digitalen Handlungssteuerung (siehe Abbildung 4.19) wie folgt an der regel- und wissensbasierten Handlungssteuerung:

- **Analyse:** Den Kern der Analyse bildet eine Auswertung und Bewertung der

aktuellen Montagesituation am Arbeitsplatz. Diese erfolgt unter Verwendung des aktuell im digitalen Abbild gespeicherten Informationszustandes der Montageumgebung. Im Wesentlichen müssen dabei zwei Tests durchgeführt werden. Zum Einen muss überprüft werden, ob der Zielzustand der Montage bereits erreicht wurde. Hier wird auf den vollständigen und korrekten Zusammenbau aller Bauteile getestet. Durch das Erreichen des Zielzustandes wird die kognitive Informationsassistentz für den aktuellen Montageauftrag beendet. Wurde der Zielzustand noch nicht erreicht, muss das digitale Abbild auf mögliche Fehler getestet werden. Diese können zum Beispiel durch die falsche Verwendung von Bauteilen oder Werkzeugen entstehen, wenn notwendige Reihenfolgen nicht eingehalten werden oder wenn Arbeiten falsch ausgeführt werden. Am Ende der Analyse steht fest, ob ein Fehler vorliegt oder nicht.

- **Entscheidung:** Die Entscheidung beinhaltet das Vorschlagen, Bewerten und Auswählen von Handlungsoptionen auf Basis der zuvor analysierten Ausgangssituation (siehe Abbildung 4.20). Im Fall eines Fehlers müssen hier Handlungen (Interventionen) zum Beheben des Fehlers ausgewertet und entschieden werden. Dies kann das Rückgängigmachen des letzten Montageschrittes sein oder zum Beispiel das Ausführen eines zusätzlichen Arbeitsschrittes. Das kognitive Informationsassistentzsystem kann diese Entscheidung nur anhand des zuvor modellierten Handlungswissens (siehe Abschnitt 4.3.3) treffen. Wissen, das nicht formalisiert bzw. modelliert wurde, steht nur dann zur Verfügung, wenn das kognitive Informationsassistentzsystem über Lernfähigkeiten zur Aneignung neuer Konzepte, Zusammenhänge und Regeln verfügt. Ähnlich verfährt es bei der Auswahl und Entscheidung des nächsten Arbeitsschrittes, wenn kein Fehler vorliegt. Hier wird genauso das vorhandene Handlungswissen auf einzelne Handlungsoptionen geprüft und nach einem geeigneten Auswahlverfahren (z.B. Kostenreduktion) der nächste Handlungsschritt gewählt. Im Ergebnis einer Entscheidung steht damit der nächste Arbeitsschritt fest.
- **Planung:** Nachdem der nächste Arbeitsschritt bestimmt wurde, muss nun durch die Planung dieser in eine operationalisierbare Prozedur bzw. Vorgehensweise umgesetzt werden. Dazu wird der Arbeitsschritt in seine sequentiellen Prozeduren zerlegt und es werden Abhängigkeiten und Effektivitätsmaße (z.B. Sekundärmontage-Prozeduren) zum Vorschlagen, Bewerten und Auswählen einer sinnvollen Prozedur verwendet (siehe Abbildung 4.20).
- **Information:** Der letzte Schritt der digitalen Handlungssteuerung ist das Bereitstellen der ausgewählten Prozedur als Handlungsempfehlung für den Werker. Hierzu werden die relevanten Informationen, wie zum Beispiel erforderliche Bauteile oder Werkzeuge, Konstruktionsmodelle, Beschreibungen, Hinweise etc., zusammengestellt und eingebettet in den Arbeitsprozess als Handlungsanleitung visualisiert. Im Fall eines zuvor erkannten Fehlers wird ebenfalls durch die gezielte Information des Werkers interveniert. Hier wird die entsprechende Handlungsempfehlung zur Intervention visualisiert.

4. Kognitive Informationsassistenz in der Montage

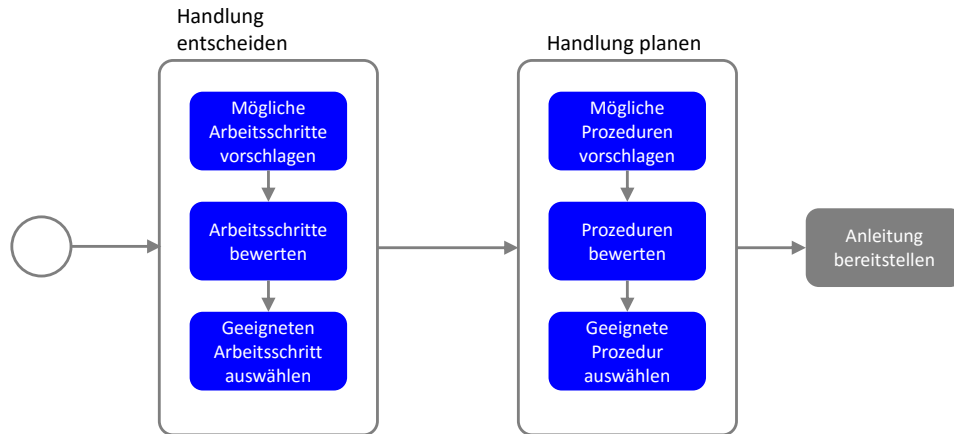


Abbildung 4.20.: Schritte zur Entscheidung und Planung der Informationsbereitstellung

Eine tiefgehende technologische Konkretisierung der Prozesse der digitalen Handlungssteuerung erfolgt in Abschnitt 4.4.2 am Beispiel der ausgewählten Basistechnologie.

4.3.5. Datenintegration

Die kognitive Automatisierung muss mit den realen Daten aus den produktionsführenden Systemen ERP und MES bzw. aus BDE und ECMS arbeiten. Diese liegen in teilweise verteilten und heterogenen Datenbankmanagementsystemen mit unterschiedlichen Datenschemata vor. Aus diesem Grund wird eine technologische Abstraktion und Integration der verteilten Datenbestände erforderlich. Dazu ist ein integriertes Datenmodell zu entwickeln und der Datenaustausch mit den produktionsführenden Systemen zu automatisieren. Beide Schritte werden im Folgenden konkretisiert.

Integriertes Datenmodell

Das integrierte Datenmodell (ID) beschreibt die montagerelevanten Daten und stellt sie zueinander in Beziehung. Dies geschieht abstrahiert auf einer den konkreten Datenbankmanagementsystemen übergeordneten Ebene. Das ID bildet die Daten in Anlehnung an die als *Entity Relationship Model* bekannte Darstellungsweise ab. Dabei werden die Daten selbst als eigenständige Entitäten mit Eigenschaften (Attributen) modelliert. Beziehungen zwischen Daten werden durch Verknüpfungen realisiert, deren Kardinalität die Anzahl teilnehmender Daten an einer Beziehung angibt. In der Regel wird die Kardinalität 1 für genau ein sowie die Kardinalität * für mindestens ein teilnehmendes Datum verwendet. Zu den Entitäten des ID werden alle Daten gezählt, die direkten Bezug zu montagerelevanten Prozessen haben und für eine technologische Unterstützung verwendet werden. Diese werden in Abbildung 4.21 entsprechend der Notation der *Unified Modeling Language* (UML) dargestellt.

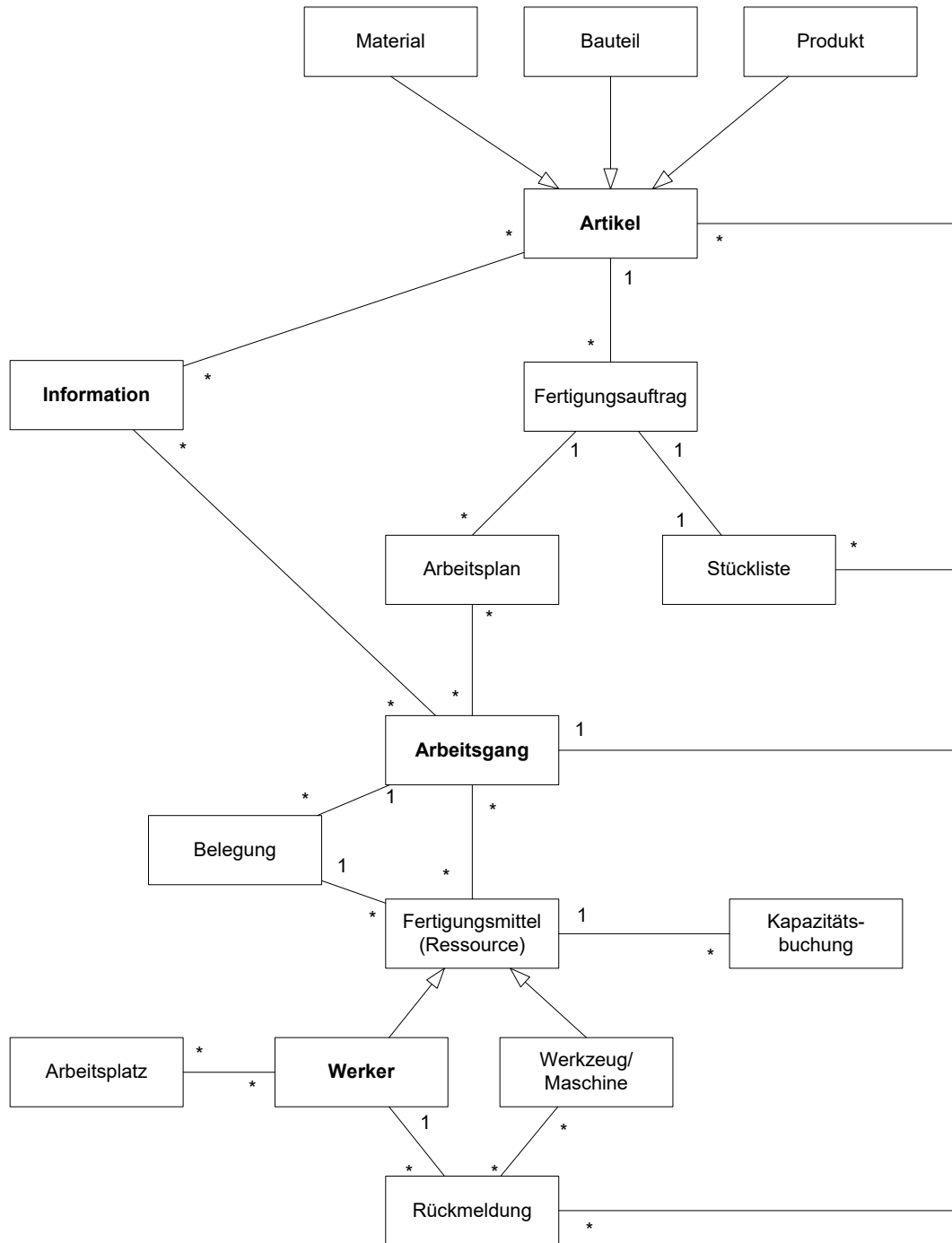


Abbildung 4.21.: Integriertes Datenmodell der manuellen Montage

Die Benennung der Entitäten orientiert sich in der Abbildung eng an der üblichen Namensgebung in ERP und MES. Eine Erklärung zu den einzelnen Entitäten bzw.

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

eine Auflistung ihrer relevanten Attribute ist Tabelle 4.2 zu entnehmen.

Tabelle 4.2.: Beschreibung der Entitäten des integrierten Datenmodell

Entität	Beschreibung	Attribute	Quelle
<i>Arbeitsgang</i>	Ein Arbeitsgang ist ein eigenständiger und in sich abgeschlossener Arbeitsschritt im Arbeitsplan. Der Arbeitsgang kann auf verschiedenen Granularitätsstufen definiert werden. Im Arbeitsgang werden Fertigungsmittel verwendet. Deren Zuordnung zum Arbeitsgang wird durch eine Belegung definiert. Im Arbeitsgang kommen Informationen zur Anwendung. Es können aber auch Rückmeldungen und Maschinendaten im Arbeitsgang entstehen.	ID Name Status Beschreibung Bearbeitungszeit Fertigungsmittel Material Arbeitsplan	MES
<i>Arbeitsplan</i>	Der Arbeitsplan ist die sequentielle oder parallele Anordnung von Arbeitsgängen, welche zur Durchführung eines Fertigungsauftrages erforderlich sind.	ID Name Fertigungsauftrag	MES
<i>Arbeitsplatz</i>	Der Arbeitsplatz ist ein Fertigungsmittel, welches die Kapazitäten mehrerer Werker zusammenfasst.	ID Name Kapazität	ERP
<i>Artikel</i>	Der Artikel ist ein Produktionsgegenstand dessen Bedarf durch die Produktion gedeckt wird oder durch die Produktion entsteht. Die Auslösung eines Fertigungsauftrages verursacht den Artikelbedarf. Die Komponenten/Baugruppen eines Artikels werden in einer Stückliste erfasst. Elemente der Stückliste sind wiederum Artikel. Rückmeldungen aus der Produktion des Artikels werden erfasst und dem Artikel zugeordnet. Dokumente kommen zur Unterstützung der Produktion des Artikels zum Einsatz.	ID Name ParentID Dimension Anzahl Gewicht Dokument Stückliste Lagerposition	ERP
<i>Belegung</i>	Die Belegung ordnet einem Arbeitsgang eine eindeutige Auswahl an Fertigungsmitteln zu.	ID Arbeitsgang Fertigungsmittel	ERP

4.3. Technologie der kognitiven Informationsassistentz

<i>Information</i>	<p>Die Information unterstützt den Montageprozess eines Artikels. Informationen können in unstrukturierten Dokumenten enthalten sein, wie zum Beispiel in:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zeichnungen/Modellen • Prüfprotokollen • E-Mails • Änderungsmitteilungen • Schulungsunterlagen • Arbeitsunterlagen • Bestellungen • Programmdateien • Bildern/Fotos. <p>Informationen sind einem Arbeitsgang zugeordnet sein.</p>	ID Name Typ URI	PLM ECMS
<i>Fertigungsauftrag</i>	Der Fertigungsauftrag ist ein innerbetrieblicher Auftrag zur Produktion einer bestimmten Menge eines Artikels zu einem bestimmten Zeitpunkt. Er wird durch den Arbeitsplan operationalisiert.	ID Name Arbeitsplan	ERP
<i>Kapazitätsbuchung</i>	Die Kapazitätsbuchung erfasst alle buchbaren Tätigkeiten von Fertigungsmitteln, die nicht in unmittelbarem Bezug zu einem Arbeitsgang stehen.	ID Fertigungsmittel Zeit	ERP
<i>Rückmeldung</i>	Die Rückmeldung erfasst Informationen zum aktuellen Arbeitsgang eines Mitarbeiters. Rückmeldungen können Fertigmeldungen, Störungsmeldungen, Rückstandsmeldungen o.ä. sein.	ID Inhalt Werker Arbeitsgang	ECMS
<i>Stückliste</i>	Die Stückliste enthält die Art und Menge der zur Produktion eines Fertigungsauftrages notwendigen Artikel.	ID Artikel	ERP

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

<i>Werkler</i>	Der Mitarbeiter wird als Fertigungsmittel auf einem Arbeitsplatz eingesetzt. Er erstellt Rückmeldungen zum aktuellen Arbeitsgang.	ID Name Kapazität	ERP
<i>Werkzeug</i>	Ein Werkzeug ist ein Fertigungsmittel, welches in Arbeitsgängen für handwerkliche Tätigkeiten eingeplant und eingesetzt wird.	ID Name	ERP

In diesem Zusammenhang gilt zu beachten, dass das digitale Abbild aus Abschnitt 4.3.4 inhaltlich eine Teilmenge des ID darstellt, welches teilweise in den Begrifflichkeiten vom ID abweicht.

Automatisierung des Datenaustausches

In Abschnitt 3.2 wurde auf die starke Heterogenität der datenverarbeitenden Systeme im Bereich der manuellen Montage hingewiesen. Dies betrifft sowohl die Datenschemata als auch Schnittstellen und Anwendungen, mit denen gearbeitet wird. Um dennoch einen direkten Austausch zwischen den produktionsführenden Datensystemen (z.B. ERP, MES) und dem Assistenzsystem zu gewährleisten, muss das Lesen und Schreiben der Daten automatisiert werden. Hierfür eignen sich insbesondere *Enterprise-Service-Bus-Technologien* [AB14; Aeh+13].

Ein Enterprise Service Bus (ESB) agiert als Nachrichtentransferschicht oberhalb der physischen Systeme in den Fachabteilungen eines Unternehmens. Es verwendet sogenannte *Adapter* zur logischen Kopplung an die unterschiedlichen Systeme. Die Adapter implementieren die systemabhängigen Funktionsschnittstellen und Datenformate und transformieren Daten aus dem Format des Quellsystems in das innerhalb des Buses verwendete Datenformat. Der Nachrichtenbus selbst stellt eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen beteiligten Systemen über den Austausch und die Transformation von Nachrichten her. Auf diese Weise werden Daten aus den führenden Systemen (z.B. ERP, MES) zusammengeführt und für eine Unterstützung des Informationsprozesses am Montagearbeitsplatz des Werkers zur Verfügung gestellt. Kern der ESB-Architektur ist ein abstraktes und integriertes Datenmodell, welches die spezifischen Datenmodelle der einzelnen Systeme in ein allgemeines Modell übersetzt und damit den Informationsaustausch zwischen den beteiligten Systemen vereinfacht. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete integrierte Datenmodell wurde dazu bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert (siehe Abbildung 4.21).

Daten aus ERP, MES oder BDE werden so in Daten des integrierten Datenmodells übersetzt und von dort an das kognitive Montageassistenzsystem verteilt. Umgekehrt werden zum Beispiel Rückmeldungen (Qualitäten, Zeiten) vom Montagearbeitsplatz über den ESB vom kognitiven Montageassistenzsystem an die führenden Systeme weitergeleitet.

4.4. Einsatz kognitiver Architekturen

Der Fokus der vorliegenden Arbeit ist die Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse des Werkers und die Automatisierung der Informationsflüsse in der manuellen Montage. Die regel- und wissensbasierte Handlungssteuerung wird dabei durch die gezielte Bereitstellung von Informationen unterstützt. Diese Funktionen sind in dem Subsystem der digitalen Handlungssteuerung bzw. im digitalen mentalen Modell zusammengefasst (siehe Abschnitt 4.3.1). Die digitale Handlungssteuerung analysiert selbstständig die aktuelle Montagesituation bzgl. vorliegender Informationsbedarfe und generiert daraus eine situationsangepasste Handlungsanleitung für den Werker. Das Subsystem zeichnet sich demzufolge durch ein intelligentes Verhalten aus. Schulte sieht in [Sch13] für die Umsetzung eines derartigen situationsangepassten Assistenzverhaltens Methoden der künstlichen Intelligenz, Soft Computing, Machine Learning, Multi-Agenten-Systeme bzw. kognitive Architekturen als geeignete Lösungsansätze.

Wie in Abschnitt 4.2 motiviert soll das Assistenzverhalten jedoch weitgehend mit dem menschlichen Gegenüber harmonisieren, um damit die gegenseitige Antizipation und Leistungsfähigkeit im Arbeitsprozess zu steigern. Hierfür eignen sich insbesondere kognitive Architekturen (siehe Abschnitt 2.3.6), da sie das technologische Nachempfinden menschlicher Kognitionsprozesse verwirklichen und somit über vorgegebene Anwendungsbereiche hinaus, den Einsatz von intelligentem Schlussfolgern zur Lösung von Problemen verfolgen.

Tabelle 4.3.: Vergleich kognitiver Architekturen nach [Sch15]. Erklärung: 3 - Herausragend, 2 - Gut, 1 - Akzeptabel, -1 - Nicht vorhanden/nicht zufriedenstellend

Kriterium	Soar	ACT-R	ICARUS	EPIC	4CAPS
Effizienz und Skalierbarkeit	2	1	1	3	2
Lernfähigkeit und Abstraktion	2	3	1	-1	2
Aktualität und Pflege	3	3	-1	-1	1
Verfügbarkeit und Plattform-unabhängigkeit	3	3	2	1	2
Technische Anwendungen	3	1	2	-1	-1
Dokumentation	3	2	2	2	1
Gesamt	16	13	7	3	7

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden durch [Sch15] entsprechende Systeme als geeignete Basistechnologien für die kognitive Informationsassistentz analysiert. Dazu wurden die fünf kognitiven Architekturen Soar, ACT-R, ICARUS, EPIC sowie 4CAPS untersucht und bewertet. Soar, ACT-R und 4CAPS wurden bereits in Abschnitt 2.3.6 vorgestellt. Bei ICARUS und EPIC handelt es sich um weitere Vertreter, die unterschiedliche Aspekte der menschlichen Kognition nachbilden. Während sich ICARUS eher als reaktives Kognitionsmodell versteht, ähnelt der EPIC-Ansatz stark der ACT-R-Architektur. Er verfügt jedoch nicht über dessen Lernfähigkeit.

Die Ergebnisse des vorgenommenen Vergleichs werden in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Hierbei wurden als Vergleichskriterien unter anderem die Effizienz bzw. die Lern- oder Abstraktionsfähigkeit eingesetzt, die nach [LLR08] wesentliche Charakteristika einer kognitiven Architektur ausmachen. Im Ergebnis wurde die kognitive Architektur *Soar* (siehe Abschnitt 2.3.6) als Favorit für die weitere Konzeption identifiziert. Darauf aufbauend wurde das technologische Umsetzungskonzept zur kognitiven Informationsassistentz entwickelt. In den folgenden Abschnitten werden wesentliche Aspekte der technologischen Konzeption dazu erläutert:

- die **Modellierung des digitalen mentalen Modells** durch die unterschiedlichen Strukturen einer kognitiven Architektur,
- die **Erfassung und Bewertung von unterschiedlichen Montagesituationen** durch ein Produktionsregelsystem sowie
- die **Entscheidung zur Handlungsanleitung** durch wahrscheinlichkeitsbasiertes Schlussfolgern und Lösen von Teilproblemen.

Diese beschreiben die konzeptionelle Umsetzung des zuvor erarbeiteten Informationsprozesses sowie von methodischen und technologischen Aspekte mit Hilfe der kognitiven Architektur Soar.

4.4.1. Modellierung des digitalen mentalen Modells

In Abschnitt 4.3.1 wurde das digitale mentale Modell als eigenständiges Subsystem der kognitiven Informationsassistentz herausgearbeitet. Es stellt digitales Handlungswissen für die digitale Handlungssteuerung bereit sowie führt eine kontinuierliche Selbstoptimierung der Wissensbasis durch.

Ähnlich dem menschlichen mentalen Modell von der Realität, modellieren kognitive Architekturen Wissen und Erfahrungen in einem vergleichbaren Mechanismus, im Langzeitspeicher. Soar stellt hierfür Speicherstrukturen zur Repräsentation von *prozeduralem* (Methoden), *semantischen* (Zusammenhänge) und *episodischem Wissen* (Erfahrungen) bereit [Lai12; LM13]. Diese Strukturen werden zur Modellierung des digitalen mentalen Modells der manuellen Montage verwendet.

Nach einer kurzen konzeptionellen Vorbetrachtung wird die Umsetzung des digitalen mentalen Modells in Soar beschrieben.

Konzeptionelle Vorbetrachtungen

Zur Modellierung des digitalen Handlungswissens im digitalen mentalen Modell müssen alle Montageoperationen und die dazugehörigen Fakten bzw. Konzepte (siehe DIN 8580, DIN 8593, VDI 2860 sowie [LW12]) in die formale Wissensrepräsentation einer kognitiven Architektur überführt werden. Eine Handlung wird dabei durch eine Produktionsregel p als Tupel in Abhängigkeit von der geltenden Ausgangssituation s , der auszuführenden Aktion a und der anschließend geltenden Endsituation s' beschrieben: $p = (s, a, s')$.

Die Ausführung der Aktion bewirkt dabei eine Situationsänderung, die sich durch eine Änderung des Informationszustandes der Montageumgebung ausdrückt (siehe Abschnitt 2.3.1). Für das Ausführen einer Fügeoperation durch Schrauben lässt sich demzufolge folgende vereinfachte Formalisierung (siehe Tabelle 4.4) ableiten:

Tabelle 4.4.: Modellierung einer Fügeoperation Schrauben als Verknüpfung von Ausgangszustand, Aktion und Endzustand

Ausgangssituation	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteil A und Bauteil B müssen miteinander gefügt werden • Fügen durch Schrauben in Bohrung • Bauteil A und Bauteil B am Arbeitsplatz justiert • Bohrung in Bauteil A und B zum Fügen vorhanden • Bohrung nicht gefüllt • Material (Schraube, Mutter) vorhanden • Werkzeug (Pneumatischer Schrauber) vorhanden
Aktion	<i>Füge Bauteil A und Bauteil B durch Schraube-Mutter-Verbindung in der Bohrung.</i>
Endsituation	<ul style="list-style-type: none"> • Bauteil A und Bauteil B am Arbeitsplatz justiert • Bohrung gefüllt • Material reduziert (Schraube -1, Mutter -1) • Werkzeug (Pneumatischer Schrauber) vorhanden

In diesem Beispiel sind die konkreten Bauteile A und B bzw. das zu verwendende Material und die Werkzeuge als Platzhalter zu verstehen. Durch die Verwendung von generischen Operator-Schablonen lassen sich in Soar für spezifische Fügeoperationen die entsprechenden Anzahlen und Auslegungen von Werkzeugen sowie Materialien

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

zur Laufzeit ableiten.

Die Endsituation beschreibt in diesem Beispiel nur die physische Veränderung des Kontextes. Eine logische Veränderung (z.B. Müssen die Bauteile weiterhin gefügt werden?) muss getrennt davon durch eine separate Regel beurteilt werden.

In den Produktionsregeln und durch die logische Verkettung von Produktionsregeln werden Handlungsstrategien abgebildet. So erfordert die manuelle Montage zum Beispiel immer die Vorbereitung eines Montageschrittes, also das Rüsten bzw. Umrüsten des Arbeitsplatzes, bevor eine Fügeoperation ausgeführt werden kann. Anschließend ist eine Ergebnisbeurteilung erforderlich. Diese allgemeinen Handlungsstrategien müssen durch die Verkettung von Produktionsregeln ausgedrückt werden. Hierfür ist jedoch das Modellieren von unterschiedlichen Montagesituationen als Bestandteil des digitalen mentalen Modells erforderlich.

Kognitive Architekturen arbeiten mit einem digitalen Abbild der Realität, um Situationen erfassen und bewerten zu können. Hierfür wird ein temporärer Arbeitsspeicher (bzw. Arbeitsgedächtnis) eingesetzt, welcher die formale Repräsentation der aktuellen Situation und damit ihren Informationszustand beinhaltet [LM13]. Dies erfolgt durch eine symbollogische Beschreibung von Entitäten und ihrer Attribute. So wird jede Entität e als n -Tupel der Form $((a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_n, b_n))$ beschrieben.

Zur weiteren logischen Strukturierung können Entitäten innerhalb von Entitäten gekapselt werden. Dann gilt $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ und $e_i \in e$. So lassen sich Element-von-Beziehungen ausdrücken.

Umsetzung in Soar

Das Handlungswissen wird in Form von Produktionsregeln (siehe [Lai+15]) modelliert und durch Selbstoptimierung bzw. Lernen zur Laufzeit erweitert. Produktionsregeln werden als Verknüpfung von einem *Produktionsnamen* (NAME), geltenden *Bedingungen* (CONDITIONS) und auszuführenden *Aktionen* (ACTIONS) beschrieben:

```
1 sp { NAME
2     CONDITIONS
3 -->
4     ACTIONS
5 }
```

Listing 4.3: Syntax einer Soar-Produktionsregel

Die Bedingungen einer Produktionsregel werden als Test für das Vorhandensein oder die Abwesenheit von Elementen im Kurzzeitspeicher [Lai+15] ausgedrückt:

```
1 (identifier-test ^attribute-test value-test)
```

Hier ist der Einsatz von Prädikatenlogik zum komplexeren Vergleich und Testen von Elementen möglich. Durch Aktionen kann das Hinzufügen oder Entfernen von Elementen im Kurzzeitspeicher, das Erstellen von Operator-Eigenschaften bzw. das Ausführen weiterer Aktionen beschrieben werden. Eine ausführliche Beschreibung der semantischen und syntaktischen Aspekte von Soar kann hierzu in [Lai+15] gefunden werden.

Die Modellierung des digitalen Handlungswissens der manuellen Montage in der kognitiven Architektur Soar beinhaltet nun folgende Aspekte:

- mögliche **Zustände** während der Vorbereitung, Ausführung und Bewertung der manuellen Montage,
- die Abbildung der relevanten Arbeitsschritte, demzufolge der **Fügeoperationen** (z.B. Schrauben) sowie **Hilfsoperationen** (z.B. Werkzeug nehmen), als Methodensammlung,
- die **Abhängigkeiten** zwischen Arbeitsschritten und Werkzeugen, Materialien, Hilfsmitteln sowie Bauteilen,
- die **Planung** von Arbeitsgängen und Arbeitsschritten innerhalb eines Arbeitsganges,
- die Erkennung von **Problemen** (z.B. falsche Montagereihenfolgen) und
- die **Ziele** einer manuellen Montage zur Behebung von Entscheidungskonflikten.

Diese Aspekte werden in Produktionsregeln des Langzeitspeichers überführt. Dabei werden zwei Modellierungsebenen verwendet. Auf der höheren Ebene werden Produktionsregeln definiert, die das Planen und Entscheiden von Arbeitsgängen modellieren. Auf der tieferen Ebene werden die Arbeitsschritte zur Ausführung eines Arbeitsganges geplant.

```

1 sp {lowlevel*propose*take-tool
2   (state <s> ^level low
3     ^desired-materials <dm>
4     ^high-state.io.input-link <input>)
5   (<dm> ^tool <t>)
6   (<input> -^tool <t>
7     ^tools < 2>)
8 -->
9   (<s> ^operator <o> +)
10  (<o> ^name take-tool
11    ^tool <t>)
12 }
```

Listing 4.4: Auf der tieferen Modellierungsebene werden die Füge- und Hilfsoperationen zur Ausführung eines Arbeitsganges abgebildet. Hier wird das Nehmen eines Werkzeuges abgebildet, wenn dieses erforderlich ist und nicht mehr als ein Werkzeug bereits verwendet wird.

Beide Modellierungsebenen stellen unterschiedliche Problemräume dar, die von der digitalen Handlungssteuerung zur Analyse, Entscheidung und Planung eingesetzt werden (siehe Abschnitt 4.4.2). Während auf der oberen Modellierungsebene als Hauptziel die vollständige Montage einer Baugruppe definiert ist, ist das Ziel der unteren Modellierungsebene die Ausführung einer Fügeoperation. Die beiden Beispiele zeigen die Art und Weise der Modellierung von Vorschlagsoperatoren auf der unteren

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

(siehe Listing 4.4) sowie auf der oberen Modellierungsebene (siehe Listing 4.5). In letzterem Beispiel wird das Erkennen von Problemen, die einen erfolgreichen Abschluss der Montage gefährden, anhand der Abhängigkeiten der möglichen Arbeitsschritte untereinander modelliert.

```
1 sp {toplevel*propose*warning*impossible
2   (state <s> ^name plant-at-hand
3     ^freemode True
4     ^superstate nil
5     ^io.input-link <input>)
6   (<input> ^depends <sd>
7     ^selected <sname>)
8   (<sd> ^<sname> <depends>)
9   -(<input> ^finished.procedures.<depends> True)
10 -->
11   (<s> ^operator <o> !)
12   (<o> ^name warning
13     ^type impossible)
14 }
```

Listing 4.5: Auf der höheren Modellierungsebene wird die Erreichbarkeit des Montageziels sowie die Abhängigkeit zwischen einzelnen Arbeitsschritten geprüft. In dieser Regel wird zum Beispiel das Vorhandensein von nicht erfüllbaren Abhängigkeiten geprüft und im Fall eines Auftretens das Warnen des Werkers vor einer Auswahl dieser Aktion vorgeschlagen.

Mit diesem Operator wird innerhalb des Entscheidungszyklus der kognitiven Architektur vorgeschlagen einen Operator *warning* zu selektieren, der eine Warnung an die Assistenzanwendung bzw. an den Werker übermittelt. Eine Entscheidung zur Annahme oder Ablehnung dieses Vorschlags fällt jedoch innerhalb der digitalen Handlungssteuerung, deren Mechanismus im folgenden Abschnitt erläutert wird.

4.4.2. Digitale Handlungssteuerung

Die digitale Handlungssteuerung übernimmt als technologisches Subsystem der kognitiven Informationsassistentz die Interpretation der Montagesituation sowie das Analysieren, Entscheiden und Planen einer Handlungsstrategie, die schließlich durch eine Informationsbereitstellung an den Werker kommuniziert wird. Der allgemeine konzeptionelle Ablauf zur digitalen Handlungssteuerung wurde dazu bereits in Abschnitt 4.3.4 erarbeitet. An dieser Stelle soll nun die technologische Umsetzung mit der kognitiven Architektur Soar beschrieben werden. Dazu werden zunächst konzeptionelle Vorbetrachtungen zur Arbeitsweise von Soar und dem Prozess der Entscheidungsfindung erläutert bevor anschließend die spezifische Umsetzung in Soar thematisiert wird.

Konzeptionelle Vorbetrachtungen

Das digitale mentale Modell ist die Grundlage für alle Entscheidungsprozesse in Soar. Diese erfolgen auf dem Kurzzeitspeicher. Im Kurzzeitspeicher befinden sich aktuell

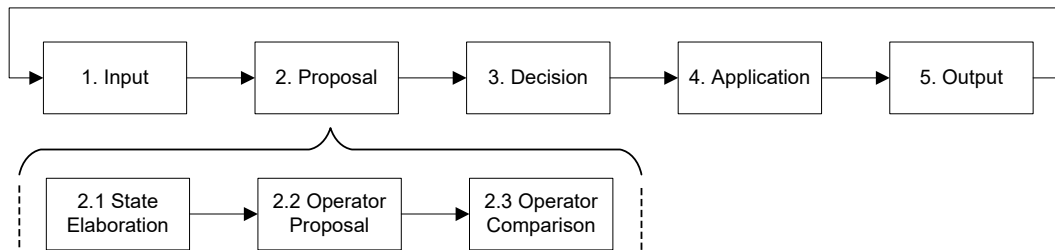


Abbildung 4.22.: Entscheidungszyklus von Soar nach [Lai+15]

gültige *Wissenselemente*, Zustände, der Zugang zur Außenwelt über den Input- und den Output-Link sowie *Operatoren*. Während Wissenselemente das Faktenwissen repräsentieren, stellen Operatoren mögliche Entscheidungsalternativen dar, demzufolge sind sie als Link auf eine Produktionsregel zu verstehen.

Der Soar-Entscheidungszyklus (siehe Abbildung 4.22) erfolgt in fünf Phasen [Lai+15]:

1. **Input:** Die Wissenselemente im Kurzzeitspeicher werden mit dem Inhalt des Input-Links aktualisiert.
2. **Proposal:** Alle gültigen Produktionsregeln zur Zustandsinterpretation (2.1), Operator-Empfehlung (2.2) und für den Operator-Vergleich (2.3) lösen aus bzw. ungültig gewordene werden zurückgezogen.
3. **Decision:** Aus den gültigen, gewichteten Operatoren wird ein Operator ausgewählt bzw. Operator-Konflikte müssen aufgelöst werden.
4. **Application:** Der gewählte Operator wird angewendet und bewirkt damit eine Veränderung des Kurzzeitspeichers.
5. **Output:** Die Ergebnisse des Entscheidungszyklus werden über den Output-Link an die Umgebung gesendet.

Innerhalb dieses Entscheidungszyklus werden demzufolge mögliche Handlungsalternativen (z.B. Material nehmen, Fügeoperation ausführen) auf ihre Relevanz für das Erreichen des aktuellen Zieles getestet, vorgeschlagen, verglichen und schließlich entschieden. Durch das Gewichten von Operatoren (siehe Listing 4.6) können hier komplexe Handlungsstrategien im Entscheidungsprozess operationalisiert werden.

Umsetzung mit Soar

In den konzeptionellen Vorbetrachtungen wurde der Entscheidungszyklus von Soar erklärt. Dieser wird nun genutzt, um das Analysieren, Entscheiden und Planen einer adäquaten Handlungsstrategie mit der Hilfe von Soar zu automatisieren. Dies geschieht auf den bereits beschriebenen zwei Ebenen. Zur Erhöhung der Abstraktion werden neben dem Startzustand *superstate* so zwei allgemeine Zustände definiert (siehe

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

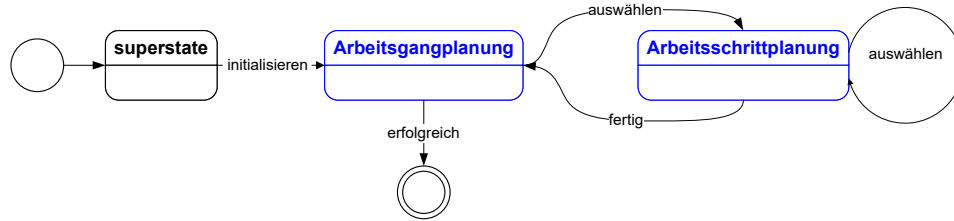


Abbildung 4.23.: Trennung der digitalen Handlungssteuerung auf der Ebene der Arbeitsgänge und der Arbeitsschritte

Abbildung 4.23). Im Zustand *Arbeitsgangplanung* (*toplevel*) wird eine übergeordnete Handlungsstrategie zur Auswahl und Sequenzierung von Arbeitsgängen sowie zum erfolgreichen Abschluss der Montage ermittelt. Im Zustand *Arbeitsschrittplanung* (*lowlevel*) wird die Handlungsstrategie innerhalb eines Arbeitsschrittes und damit die Auswahl und Sequenzierung von Prozeduren oder das Erkennen von Montagefehlern umgesetzt.

Für eine Erläuterung der Umsetzung des Analysierens, Entscheidens und Planens zur Montageunterstützung mit Soar soll ein Beispiel herangezogen werden. In Abbildung 4.24 wird ein einfaches Entscheidungsproblem in der Montage auf den Soar-Entscheidungsmechanismus übertragen. Hierbei liegen im Initialzustand vier Bauteile b_1, b_2, c_1 und c_2 vor, von denen jeweils zwei in einem Zwischenmontageschritt zu b und c gefügt werden. Anschließend kann eine Endmontage zum Produkt a erfolgen. Die Darstellung zeigt, dass im Initialzustand mindestens drei mögliche Operatoren vorliegen $O1, O2$ und $O3$.

Der Operator $O3$ wird in Soars Proposal-Phase jedoch nicht vorgeschlagen, weil die Ausgangsbedingung, das Vorhandensein von b und c nicht zutrifft. Entsprechend muss sich Soar zwischen $O1$ und $O2$ entscheiden. Die Gestaltung der Ausgangsbedingungen für beide Operatoren, eventuelle Gewichtungen sowie die Vorerfahrung und Retrospektive von Soar im Entscheidungsprozess wird nun zu einer Auswahl eines Operators oder Gleichgewichtung (*Impasse*) beider Operatoren führen. In letzterem Fall hilft wiederum das im digitalen mentalen Modell abgebildete Handlungswissen diesen bereits im Vorfeld durch Gewichtung oder Lernprozesse zu umgehen. An dieser Stelle soll auf den Kostenvektor aus Abschnitt 4.3.3 verwiesen werden. Die unterschiedlichen Komponenten des Vektors eignen sich als Gewichtungskriterium insbesondere für den Fall eines Impasses.

```

1 sp {lowlevel*prefer*join
2 (state <s> ^operator <o1>
3 ^operator <o2>)
4 (<o1> ^name take-tool)
5 (<o2> ^name join)
6 -->
7 (<s> ^operator <o1> < <o2>)

```

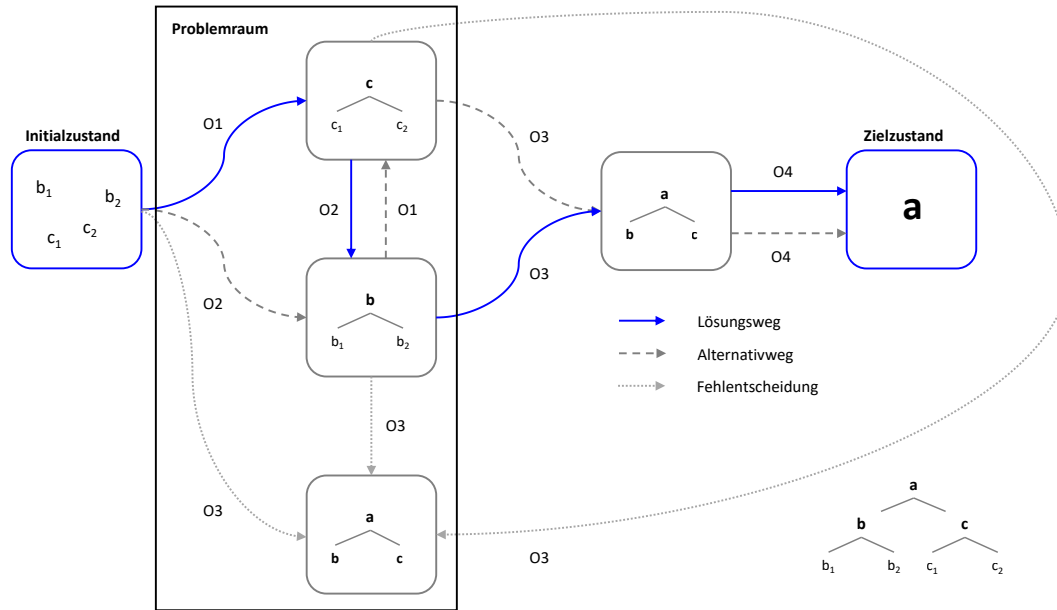


Abbildung 4.24.: Ausgehend von einem Initialzustand öffnet Soar in jedem Zyklus einen Problemraum innerhalb dessen Grenzen die Bewertung und Entscheidung der Operatoren erfolgt. Unterschiedliche Entscheidungen führen zu abweichenden Lösungswegen.

8 }

Listing 4.6: Die Produktionsregel zeigt das Priorisieren zweier Operatoren für den Fall, dass das Ausführen einer Fügeoperation (type join) möglich ist und gleichzeitig andere Operatoren (hier das Aufnehmen eines Werkzeuges) vorgeschlagen werden. Dann wird das Ausführen der Fügeoperation präferiert und entsprechend im Operator-Vergleich umgesetzt.

In Listing 4.6 wird diese Art der Priorisierung von Operatoren im Entscheidungsprozess an einem Beispiel illustriert. Dieses zeigt den Vorrang von Primär- gegenüber Sekundärmontageschritten. Ähnliche Gewichtungen lassen sich während der Modellierung auch für die Minimierung der Umrüstzeiten oder die Einhaltung von ergonomisch sinnvollen Einbaureihenfolgen definieren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde beispielhaft die Optimierung zugunsten von Primärmontagevorgängen sowie die Reduzierung der Rüstzeiten zwischen Arbeitsschritten verfolgt.

Am Ende jedes Entscheidungszyklus wird der ausgewählte Operator als Entscheidung umgesetzt. Für das kognitive Informationsassistenzsystem bedeutet das, dass der gewählte Operator in eine Empfehlung abgebildet und über den Output-Link von Soar an die Visualisierungskomponente übertragen wird. Es werden dazu folgende Empfehlungen unterschieden:

- **Arbeitsgang auswählen (select):** Im Zustand toplevel wird eine Planung der Montagereihenfolge in Arbeitsgängen vorgenommen. Nach der Auswahl

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

eines Fertigungsauftrages bzw. dem Abschluss eines Arbeitsganges empfiehlt das Assistenzsystem daher die Wahl eines bestimmten Arbeitsganges.

- **Material nehmen** (*take-material*): Im Zustand lowlevel wird auf den Materialbedarf des aktuellen Arbeitsganges getestet, ist dieser noch nicht erfüllt so wird die Entnahme des noch fehlenden Materials empfohlen.
- **Material zurücklegen** (*putback-material*): Wurde im Zustand lowlevel ein Arbeitsgang gewechselt bzw. zu viel Material entnommen, welches nun die Arbeit aufgrund seiner Anzahl oder Größe behindert, wird das Zurücklegen dieses Materials empfohlen.
- **Bauteil nehmen** (*take-part*): Die Bereitstellung von Bauteilen innerhalb eines Arbeitsganges entspricht hier dem Vorschlag zur Entnahme von Material. Eine Unterscheidung von beiden ist sinnvoll, da Bauteile über eine eindeutige Bauteilnummer (RFID-Tag) verifiziert werden, während Material (z.B. Schrauben) keine eindeutige Kennzeichnung aufweisen.
- **Bauteil zurücklegen** (*putback-part*): Auch der Vorschlag Bauteile zurückzulegen erfolgt aus den gleichen Gründen, wie im Fall des Materials.
- **Werkzeug nehmen** (*take-tool*): Für die Ausführung einer Fügeoperation kann Werkzeug erforderlich sein. Deren Bereitstellung wird empfohlen, wenn das Werkzeug ohnehin noch nicht am Arbeitsplatz registriert wurde.
- **Werkzeug zurücklegen** (*putback-tool*): Für das Umrüsten zwischen Arbeitsgängen kann das Zurücklegen von Werkzeugen erforderlich sein. Genauso können modellierungsbedingt nur maximal zwei Werkzeuge gleichzeitig gehalten und eingesetzt werden. Darum wird das Zurücklegen nicht benötigter Werkzeuge empfohlen.
- **Fügeoperation ausführen** (*join*): Jeder Arbeitsgang wird durch das Ausführen einer Fügeoperation abgeschlossen. Wenn alle erforderlichen Materialien, Bauteile und Werkzeuge vorliegen, wird darum das Ausführen der Fügeoperation empfohlen.
- **Fehler korrigieren** (*failure*): Kann das aktuelle Ziel (Abschluss des Arbeitsganges oder des Fertigungsauftrages) nicht erreicht werden, so empfiehlt das Assistenzsystem den letzten Arbeitsschritt rückgängig zu machen. Abhängig vom verwendeten Unterstützungsmodus werden so nur gravierende (freier Arbeitsmodus) oder auch unkritische Abweichungen (strenger Arbeitsmodus) vom geplanten Montageablauf erkannt und eine Korrektur empfohlen.

In der Visualisierungskomponente werden die Empfehlungen als textuelle und bildliche Arbeitshinweise oder als Aktionen der Anwendung visualisiert.

Selbstoptimierung in Soar

Zur kontinuierlichen Selbstoptimierung des Entscheidungsverhaltens werden die Soar-Mechanismen *Zusammenfassen* (Chunking) und *Reinforcement Learning* (RL) eingesetzt. Durch das Zusammenfassen werden parallel zur Laufzeit neue Produktionsregeln erstellt, die den Entscheidungsprozess optimieren.

Tabelle 4.5.: Einfluss der Selbstoptimierung auf wesentliche Nennwerte der Leistungsfähigkeit. Im ersten Versuch wurde nur mit dem digitalen mentalen Modell gearbeitet, im zweiten Durchlauf war dies bereits mit zusammengefassten Regeln (chunks) und RL-Erweiterungen der bestehenden Produktionsregeln ergänzt.

Kategorie	ohne Selbstoptimierung	mit Selbstoptimierung
Erforderliche Entscheidungen	169	22
Entscheidungszyklen	650	67
Vorgeschlagene Operatoren	2.548	163
Änderungen im Kurzzeitgedächtnis	9.097	761
CPU-Zeit	0,047 s	0,005 s

Die in Tabelle 4.5 dargestellten Ergebnisse aus zwei Versuchen zeigen eine deutliche Steigerung der Leistungsfähigkeit der digitalen Handlungssteuerung durch den Einsatz von Ansätzen zur Selbstoptimierung [AU15]. In diesen Versuchen wurde ein vollständiger Handlungsplan für einen Arbeitsgang mit Soar und den zuvor erstellten Produktionsregeln für die Montage generiert. Dabei wurde in einem ersten Versuch keine Selbstoptimierung während der Generierung eingesetzt und anschließend in einem zweiten bereits mit den optimierten Produktionsregeln gearbeitet. Insbesondere durch das Chunking konnte die Anzahl an vorgeschlagenen Operatoren um den Faktor 15 reduziert werden. Dies wirkt sich positiv auf die Anzahl der erforderlichen Entscheidungen sowie auf die dazu erforderliche CPU-Zeit aus.

Das Reinforcement Learning wurde in den Versuchen für eine kostenorientierte Reduzierung der Umrüstzeit zwischen zwei Arbeitsgängen verwendet. So wurde hier das Zurücklegen von Material, Bauteilen und Werkzeugen mit einer negativen Belohnung bewertet:

```

1 sp {lowlevel*apply*putback-tool*substate
2   (state <s> ^level low
3     ^operator <o>
4     ^reward-link <rl>
5     ^high-state.io.input-link <input>
6     ^superstate.superstate nil)

```

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

```
7      (<o> ^name putback-tool ^tool <t>)  
8      (<input> ^tool <t> ^tools <num>)  
9  -->  
10     (<input> ^tool <t> -^tools <num> - (- <num> 1))  
11     (<rl> ^reward.value -1)  
12 }
```

Listing 4.7: Modellierung einer negativen Belohnung (*reward value*) für das Zurücklegen eines Werkzeuges mit Hilfe von Reinforcement Learning.

In Listing 4.7 wird das Anwenden des Operators *putback-tool* mit einem negativen Wert für den Reward-Link kombiniert. Die Wahrscheinlichkeit für das Auswählen des Operators wird dadurch reduziert. Dadurch wird, sofern möglich, die Auswahl dieses Operators über die Laufzeit betrachtet vermieden.

4.5. Zusammenfassung und Bewertung

In diesem Kapitel wurde ein konzeptioneller Ansatz für die Umsetzung kognitiver Informationsassistentz zur Unterstützung des Werkers in der manuellen Montage auf drei Ebenen erarbeitet. Dazu wurde zunächst eine systemtheoretische Betrachtung der Beziehungen zwischen Informations-, Kognitions- und Arbeitsprozess zur Entwicklung eines integrierten Prozessmodells für die kognitive Informationsassistentz durchgeführt. Anschließend wurde ein methodischer Ansatz für die Umsetzung kognitiver Informationsassistentz basierend auf bewährten psychologischen und pädagogischen Modellen entwickelt. Durch die Entwicklung der technologischen Modelle und Konzepte sowie ihre Konkretisierung auf Basis kognitiver Architekturen wurden die relevanten Kernkomponenten der kognitiven Informationsassistentz sowie deren innerer Aufbau und ihre Funktionsweise herausgearbeitet.

Durch diese Vorgehensweise wurden die in Kapitel 3 beschriebenen Analysearbeiten und ersten Modelle aufgegriffen und im Rahmen der Konzeption angewendet. Die wesentlichen Erkenntnisse daraus lassen sich wie folgt als Thesen für die vorliegende Arbeit formulieren:

1. Die Wirksamkeit der kognitiven Informationsassistentz ist stark abhängig vom Grad der Verzahnung der Informations-, Kognitions- und Arbeitsprozesse. Durch kognitive Informationsassistentz wird jedoch ausschließlich der Informationsprozess aktiv gestaltet und angepasst, die anderen Prozesse werden damit indirekt beeinflusst.
2. Eine enge Verbindung zwischen dem technischen Informationsprozess und dem menschlichen Kognitionsprozess gelingt nur durch einen adaptiven Lösungsansatz, der die psychologische und die pädagogische Komponente der Zusammenarbeit zwischen dem Menschen und dem Assistenzsystem berücksichtigt.
3. Kognitive Informationsassistentz unterstützt die kognitiven Arbeitsprozesse Denken, Erinnern, Lernen und Speichern durch die Umsetzung von sechs Haupt-

aufgaben: Bewusstmachen, Führen, Anleiten, Dokumentieren, Überprüfen und Vorbeugen.

4. Die technologischen Komponenten der kognitiven Informationsassistentz sind die Interaktion mit der Montageumgebung, die digitale Handlungssteuerung, das digitale mentale Modell und die Datenintegration.
5. Das digitale mentale Modell bildet das für die Montage erforderliche Handlungswissen sowie Handlungswissen zur effektiven Zusammenarbeit mit dem Werker ab. Es beinhaltet damit die Grundlagen zur kooperativen Problemlösung als auch eine flexible Anpassung der Zusammenarbeit und Wahrnehmung der Hauptaufgaben kognitiver Informationsassistentz.
6. Die digitale Handlungssteuerung bildet den technologischen Prozess der Analyse, Entscheidung und Planung einer geeigneten Handlungsoption zur Unterstützung des Werkers ab.
7. Kognitive Architekturen eignen sich aufgrund ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise zur Umsetzung des digitalen mentalen Modells sowie der digitalen Handlungssteuerung als Kernkomponenten der kognitiven Informationsassistentz.

Durch die Konzeption werden die zweite und die dritte wissenschaftliche Leitfrage aus Abschnitt 1.3 beantwortet. Es wurden dazu die technologischen Komponenten und Verfahren zur kognitiven Informationsassistentz identifiziert und konzeptionell herausgearbeitet. Weiterhin wurde die Einordnung der Komponenten in einem mehrschichtigen Architekturmodell vorgenommen, welches die Komponenten miteinander integriert. Die wesentlichen Ergebnisse der Konzeption im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind:

- Das **Prozessmodell für die kognitive Informationsassistentz** (siehe Abschnitt 4.1.2) verbindet den technologischen Informationsprozess mit den Prozessen zur Erstellung und Anwendung eines digitalen mentalen Modells. Er bildet somit auf der Prozessebene die verfahrenstechnische Grundstruktur für die kognitive Informationsassistentz in der Montage. Aus diesem Prozessmodell wurden die erforderlichen technologischen Komponenten und Verfahren sowie ihre Beziehungen zueinander abgeleitet. Das Prozessmodell ist damit gleichzeitig die Basis für die Integration der Komponenten in einer technologischen Gesamtarchitektur (siehe Abschnitt 4.3.1).
- Die **Hauptaufgaben der kognitiven Informationsassistentz** (siehe Abbildung 4.7) stellen eine konzeptionelle Verknüpfung des menschlichen Kognitionsprozesses mit dem technischen Informationsprozess her. Damit soll ein hoher Wirkungsgrad der kognitiven Informationsassistentz durch unmittelbar an die kognitiven Arbeitsprozesse Denken, Erinnern, Lernen und Speichern anschließende Unterstützungsfunktionen des kognitiven Informationsassistentzsystems erzielt werden.

4. Kognitive Informationsassistentz in der Montage

- Der **methodisch fundierte Lösungsansatz** verbindet das psychologische Konzept der Team Cognition mit dem pädagogischen Einsatz situierten Lernens auf der Basis des Cognitive-Apprenticeship-Konzeptes (siehe Abschnitt 4.2) und setzt damit die konzeptionelle Verknüpfung von Informationsprozess und Kognitionsprozess in der Montage um.
- Das Konzept eines **digitalen mentalen Modells** (siehe Abschnitt 4.3.3) ergänzt die bereits heute zur Arbeitsplatzsteuerung eingesetzten MES um das erforderliche situative Handlungswissen, welches zur adaptiven Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse des Werkers in der manuellen Montage erforderlich ist. Es bildet damit die verfahrenstechnischen Grundlagen, wie zum Beispiel Ziele, Zusammenhänge, Handlungsoptionen oder Bewertungsmaßstäbe der Montage, in einem formalisierten und automatisiert verarbeitbaren Regelsystem ab.
- Die **Technologie der digitalen Handlungssteuerung** (siehe Abschnitt 4.3.4) ist das informationstechnologische Bindeglied zwischen den produktionsführenden Systemen ERP, MES und BDE sowie dem Montagearbeitsplatz. Sie automatisiert wesentliche Teilbereiche der kognitiven Informationsassistentz zur Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse des Werkers, so zum Beispiel das Analysieren, Entscheiden und Planen einer situativ angemessenen Handlungsstrategie für die Montage.
- Der **Einsatz einer kognitiven Architektur** (siehe Abschnitt 4.4) konkretisiert die konzeptionellen Modelle und Verfahren an einem ausgewählten Basissystem und zeigt damit die technologische Machbarkeit der vorgeschlagenen Lösungsansätze für den Anwendungsbereich der Montage an beispielhaften Ausschnitten und Aspekten der kognitiven Informationsassistentz.

Aus den angeführten Ergebnissen der Konzeption wurde das *Plant@Hand Montageassistentzsystem* als Beispiellösung entwickelt, welches ausgewählte Konzepte aus diesem Kapitel prototypisch umsetzt. Im anschließenden Kapitel 5 wird diese hardwaretechnische, softwaretechnische und methodische Umsetzung beschrieben sowie eine Evaluation des Systems vorgenommen.

5. Plant@Hand Montageassistentz

Im letzten Kapitel wurden die konzeptionellen Betrachtungen zur Umsetzung der kognitiven Informationsassistentz in der manuellen Montage beschrieben. Diese bilden die Grundlage für die prototypische Realisierung wesentlicher Aspekte im *Plant@Hand Montageassistentzsystem*. In den folgenden Abschnitten wird Plant@Hand als Assistentzsystem für die manuelle Montage vorgestellt. Dabei werden die erarbeiteten Konzepte zur Unterstützung der kognitiven Prozesse des Werkers sowie zu der dazu erforderlichen Automatisierung der Informationsflüsse anhand der prototypischen Realisierung in wesentlichen Merkmalen erstmalig implementiert. Das Plant@Hand Montageassistentzsystem ist in diesem Zusammenhang als modulare Beispiellösung zu betrachten. Es wurde in der Implementierung zum Beispiel mehr Wert auf die Aspekte der digitalen Handlungssteuerung oder des digitalen mentalen Modells gelegt. Andere Aspekte, wie zum Beispiel die Erfassung der aktuellen Montagesituation, wurden mit einfachen Mitteln umgesetzt. Sie lassen sich jedoch einfach auf die industrielle Praxis durch die Anbindung von bestehenden Lösungen (z.B. Pick-by-Light-Systeme, Kamerasysteme) übertragen.

In Abschnitt 5.1 wird dazu zunächst das Einsatzszenario erläutert bevor die hardwaretechnische (Abschnitt 5.2) und die softwaretechnische Umsetzung (Abschnitt 5.3) beschrieben wird. Anschließend erfolgt in Abschnitt 5.4 die Beschreibung der Umsetzung der methodischen Ansätze Team Cognition und des Cognitive Apprenticeship Model im Plant@Hand Montageassistentzsystem. Eine Evaluation des Plant@Hand Montageassistentzsystems in zwei Testgruppen soll schließlich in Abschnitt 5.5 Antworten auf die vierte wissenschaftliche Leitfrage der vorliegenden Arbeit geben.

5.1. Einsatzszenario

Das Plant@Hand Montageassistentzsystem wurde für die Unterstützung der manuellen Montage von komplexen und räumlich großen Anlagen (z.B. Schweißportale, Kältetechnikzentralen) konzipiert. Diese erfordert vom Werker ein hohes Maß an Flexibilität und Mobilität. Durch die räumliche Verteilung seiner Montageaufgaben ist er darum auf die örtlich wechselnde Bereitstellung von Material, Werkzeug und Informationen angewiesen. In diesem Zusammenhang ist die Nutzung eines Werkstattwagens (siehe Abbildung 5.1) zum Mitführen der benötigten Werkzeuge und Hilfsmittel üblich. Der Werker übernimmt hier die Verantwortung für die Vollständigkeit und Pflege der ihm überlassenen Werkzeuge.

Bauteile sowie Materialien werden ebenfalls auf mobilen Trägerplattformen mitgeführt oder sie befinden sich an lokalen Lagerorten in der Nähe der Montage-

5. Plant@Hand Montageassistenz



Abbildung 5.1.: (links) Werkstattwagen als Aufbewahrungsort und Unterstützungssystem für den Werker in der manuellen mobilen Montage (Quelle: HAZET-WERK Hermann Zerver GmbH & Co. KG, <http://www.hazet.de>) und (rechts) Beispiel für die Montageanleitung eines Kältetechnikaggregats

ausführung. Die Anweisungen zur Montage liegen für den Werker als schriftliche und teilweise bebilderte Montageanleitungen mit 2D-Zeichnungen und Anwendungshinweisen vor (siehe Abbildung 5.1).

In diesem Szenario soll das Plant@Hand Montageassistenzsystem zur mobilen Informationsversorgung des Werkers eingesetzt werden. Es wird dazu mit dem Werkstattwagen integriert.

5.2. Hardwaretechnische Umsetzung

Das Plant@Hand Montageassistenzsystem integriert unterschiedliche Hardware-Komponenten in einem kompakten Prototyp.

Als technische Basis wurde ein *elbetec* Werkstattwagen eingesetzt, der neben dem Werkzeug auch Material mitführt. In diesen Werkstattwagen wurde zusätzliche Hardware (siehe Abbildung 5.2) zur Interaktion mit der unmittelbaren Montageumgebung, zur Ausführung der kognitiven Automatisierung und zur Visualisierung des Plant@Hand Montageassistenzsystem integriert:

- **Sensorik:** Im oberen Fach des Werkstattwagens befinden sich Materialschalen zur Aufbewahrung von kleinteiligem Montagematerial (z.B. Schrauben, Muttern). Diese Schalen sind am Boden mit jeweils einem *Drucksensor* (Interlink FSR402, Messbereich 0.2N - 20N) verbunden. Über den Drucksensor



Abbildung 5.2.: Elbetec Werkstattwagen und Hardware-Komponenten des Plant@Hand Montageassistenzsystems

werden Gewichtsveränderungen der Schale erfasst. Zeitweise kam zusätzlich ein Raster aus *Infrarot-LED* (870nm) und *Photodioden* (Fairchild Semiconductor QSD2030F) zum Einsatz, um den Handzugriff des Werkers in den Schalen zu registrieren. An den Werkzeugen sind *RFID-Phiole* angebracht, die über einen *RFID-Sensor* (ID-Innovations ID-20LA, 125 kHz) ausgelesen werden.

- **Arduino MEGA ADK R3:** Die Signalvorverarbeitung erfolgt über einen Arduino MEGA ADK mit einem ATmega2560 Microcontroller bei einer Taktfrequenz von 16 MHz.
- **Intel NUC Mini-PC:** Alle rechenintensiven Prozesse laufen auf einem Intel NUC Mini-PC. Dieser verfügt über einen Intel Core i5-4250U Prozessor und 4GB DDR-RAM.
- **ELO 15" LCD Touch-Display:** Das Plant@Hand Montageassistenzsystem wird auf einem ELO 15" LCD Touch-Display dargestellt. Dieses erlaubt die kapazitive Eingabe mittels Touch-Gesten und Touch-Interaktion.

Die Verbindung dieser Komponenten wird durch Abbildung 5.3 illustriert. Die Drucksensoren werden analog vom Arduino MEGA ADK ausgelesen, welcher zusammen mit dem RFID-Reader über die USB-Schnittstelle an den Intel NUC angeschlossen wird. Das Touch-Display wird über DVI und ebenfalls USB mit dem Intel NUC verbunden. Die Tastatur bzw. das Touchpad kommunizieren via Bluetooth mit dem Intel NUC.

Da sich die extrem wechselhaften Arbeitsbedingungen in der Montage auch auf die Hardware auswirken können, wurde auf eine möglichst robuste Ausführung der physischen Komponenten Wert gelegt bzw. weitgehend auf Funkverbindungen verzichtet. Die Bluetooth-Tastatur kann bei möglichen Funkstörungen durch ein kabelgebundenes Ersatzgerät ausgetauscht werden.

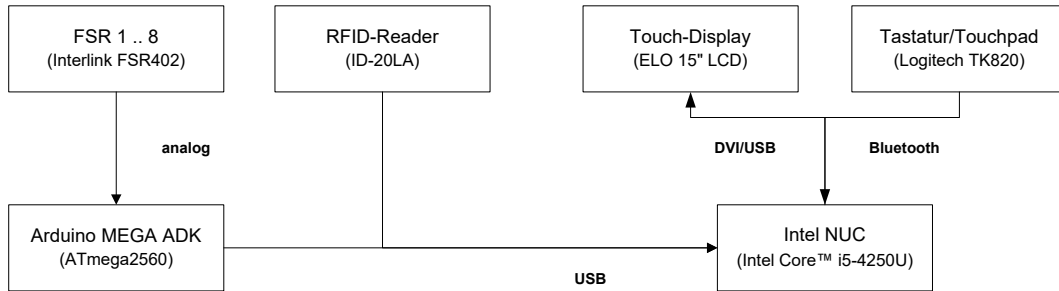


Abbildung 5.3.: Physische Verbindung der Hardware-Komponenten des Plant@Hand Montageassistenzsystems

5.3. Softwaretechnische Umsetzung

Die in Kapitel 4 entwickelten Konzepte, Methoden und Modelle für kognitive Informationsassistenz wurden exemplarisch im Plant@Hand Montageassistenzsystem softwaretechnisch umgesetzt. Dazu wurden bereits vorhandene Softwaresysteme für die Abbildung von Basis-Funktionalitäten und Schnittstellen verwendet:

- **Tornado:** Für die Bereitstellung der visuellen Assistenzanwendung wurde eine Web-Anwendung präferiert, da diese auf der Mehrheit unterschiedlicher Endgeräte und unabhängig vom Betriebssystem funktioniert. Für das Hosting kommt daher der Tornado Webserver¹ zum Einsatz, welcher als Python Framework einerseits sehr leichtgewichtig aber auch leistungsfähig und stark skalierbar ist. Durch Tornado werden bereits Standard-Schnittstellen zur Kommunikation mit Endgeräte bereitgestellt, wie zum Beispiel HTTP, REST oder Websockets.
- **Polymer:** Ein Grundprinzip zur Umsetzung der Assistenzanwendung ist die Trennung von Daten, Logik und Darstellung. Für die Vereinfachung der Darstellung wird das Polymer Framework² eingesetzt, welches Vorlagen für die strukturierte Entwicklung von Web-Anwendungen mit HTML5 zur Verfügung stellt. Die Vorlagen bilden die erforderlichen interaktiven Elemente inklusive ihrer grafischen Gestaltung ab.
- **Soar:** Als Kernkomponente für die digitale Handlungssteuerung wurden in Abschnitt 4.4.2 kognitive Architekturen verwendet. Nach einer Analyse unterschiedlicher Systeme in [Sch15] wurde Soar³ aufgrund seiner großen Flexibilität und Leistungsfähigkeit ausgewählt. Soar übernimmt damit in der softwaretechnischen Umsetzung die Funktionen zur Situationserfassung, Entscheidungsunterstützung, Informationsunterstützung sowie zur Modellierung des digitalen mentalen Modells.

¹Tornado Webseite: <http://www.tornadoweb.org>

²Polymer Webseite: <https://www.polymer-project.org>

³Soar Webseite: <http://soar.eecs.umich.edu>

Die Implementierung der logischen Komponenten erfolgte so auf drei Ebenen. Hardwareseitig wurden Funktionen zur Vorverarbeitung von Sensorsignalen in C/C++ geschrieben. Die zentrale Logik der Webanwendung wurde in Python entwickelt und die Entwicklung der Visualisierungslogik erfolgte mit HTML5 und Javascript.

In Abbildung 5.4 wird die Komponentenstruktur des Plant@Hand Montageassistenzsystems in UML-Notation dargestellt.

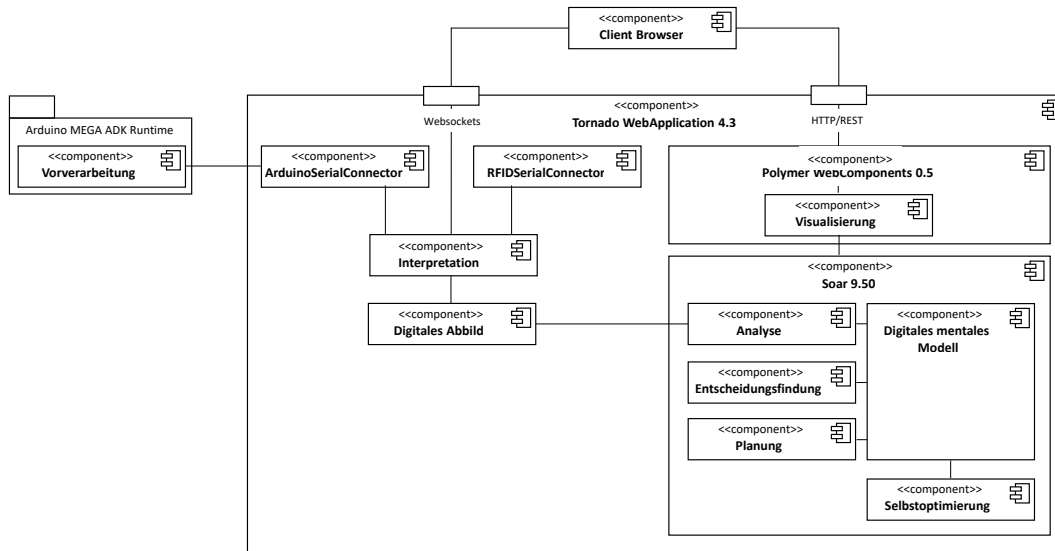


Abbildung 5.4.: Komponentendiagramm des Plant@Hand Montageassistenzsystems

In der Abbildung wird die Kapselung von Aufgaben durch die Komponentenhierarchie deutlich. Die Funktionsweise der einzelnen Komponenten wird in den anschließenden Abschnitten nun näher beschrieben.

5.3.1. Umsetzung des Datenflusses

Der prinzipielle Datenfluss des Plant@Hand Montageassistenzsystems wird in Abbildung 5.5 dargestellt. In diesem sind vier externe Einheiten für die Interaktion mit der Montageumgebung vorhanden: *Drucksensoren* (FSR), *RFID-Reader*, *Display* sowie *Tastatur/Touchpad*. Als Datenspeicher kommen das *digitale Abbild*, das *digitale mentale Modell* sowie ein *Dokumentenspeicher* zum Einsatz. Das digitale Abbild entspricht dabei der datentechnischen Repräsentation der relevanten Montageumgebung. Es speichert den Zustand von Werkzeugen, Material, Bauteilen und zum aktuellen Arbeitsgang. Das digitale mentale Modell enthält das kontextualisierte Hintergrundwissen zur Montage in Form von Produktionsregeln. Der Dokumentenspeicher beinhaltet Informationen und Dokumente (z.B. Konstruktionsmodelle, Hinweistexte, Bilder), die im Rahmen der Montage bereitgestellt werden.

Die Verarbeitung der Daten erfolgt nun in einem zyklischen Prozess:

1. **Wert ermitteln:** Aus den ursprünglichen und teilweise analogen Sensordaten

5. Plant@Hand Montageassistenz

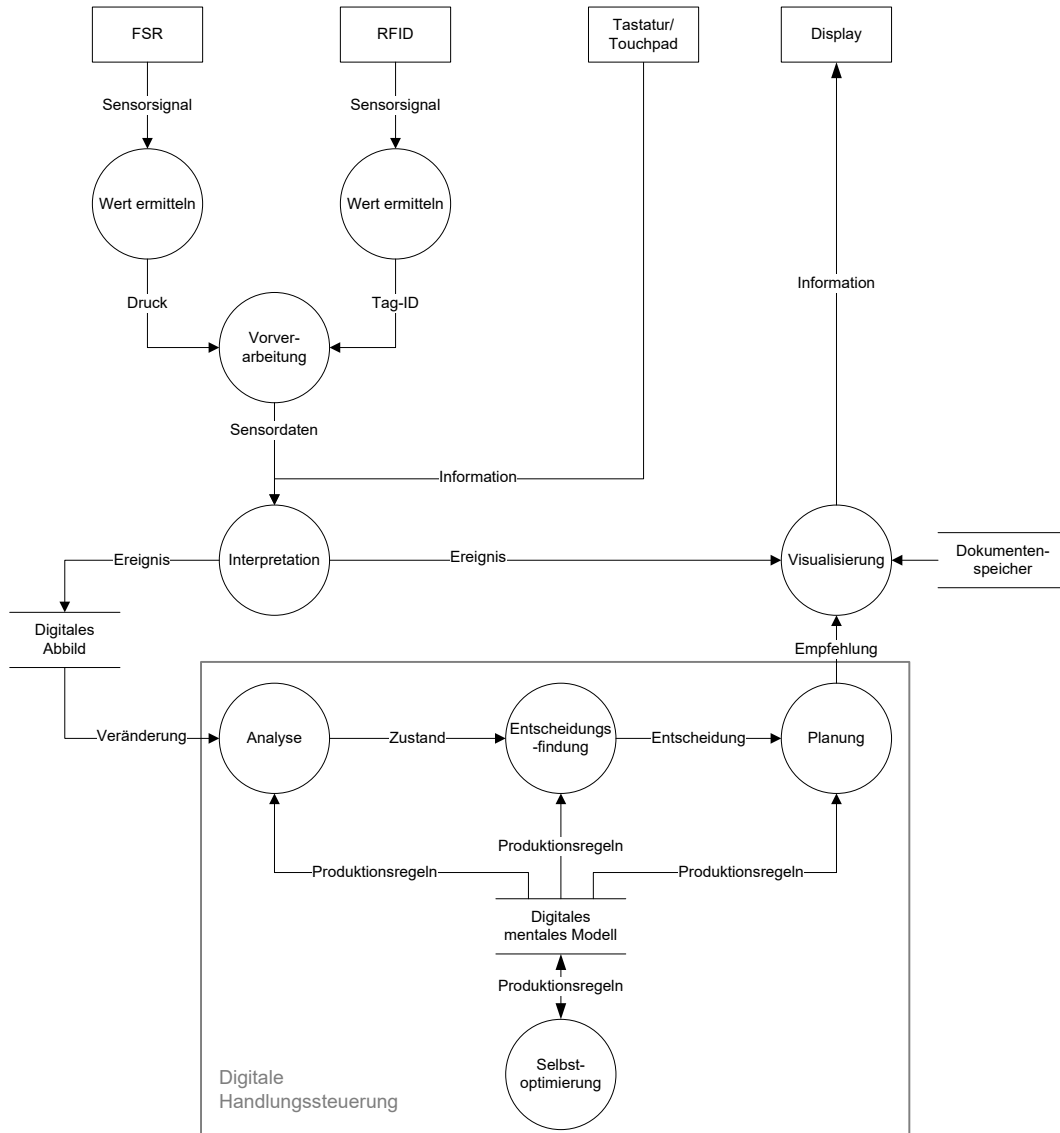


Abbildung 5.5.: Datenflüsse des Plant@Hand Montageassistenzsystems in der UML-Notation

werden diskrete Sensorwerte ermittelt, in diesem Fall ein digitaler Druckwert und die digitale ID des verwendeten RFID-Tags.

2. **Vorverarbeitung:** Die Sensorwerte werden gefiltert sowie vorverarbeitet, um mögliche Seiteneffekte z.B. zwischen benachbarten Materialschalen zu reduzieren.
3. **Interpretation:** Die bereinigten Sensordaten sowie Informationen vom Werker (Touch- bzw. Tastatureingaben) werden interpretiert, um eine Aussage über eingetretene Ereignisse (z.B. Materialentnahme) zu treffen. Neue Ereignisse führen zu einer Aktualisierung des digitalen Abbildes.
4. **Analyse:** Das digitale Abbild der Realität wird zur Ableitung und Analyse des aktuellen Zustandes verwendet. Dazu wird kontextuelles Hintergrundwissen aus dem digitalen mentalen Modell in Form von Produktionsregeln verwendet.
5. **Entscheidungsfindung:** Auf Basis des ermittelten Zustandes wird eine Entscheidung über den aktuellen Handlungsbedarf getroffen. Auch hier kommt kontextuelles Hintergrundwissen durch die Produktionsregeln des digitalen mentalen Modells zum Einsatz.
6. **Selbstoptimierung:** Zur kontinuierlichen Selbstoptimierung wird das Entscheidungsverhalten sowie der Inhalt des digitalen mentalen Modells analysiert, bewertet und verändert. Dadurch verbessert sich das Entscheidungsverhalten in zukünftigen Situationen.
7. **Planung:** Aus der Entscheidung über den aktuellen Handlungsbedarf wird eine Empfehlung über den nächsten Arbeitsschritt für den Werker mit Hilfe von Produktionsregeln aus dem digitalen mentalen Modell abgeleitet.
8. **Visualisierung:** Die Empfehlung wird in eine Visualisierung übertragen, um relevante Dokumente zur Unterstützung (z.B. Konstruktionszeichnung) ergänzt und als Informationen auf dem Display dargestellt.

Dieser Prozess ist ereignisgesteuert und wiederholt sich bei dem Eingang neuer Signale an den Sensoren bzw. neuer Informationen vom Werker. Die Prozessschritte 4-7 sind funktionaler Bestandteil der digitalen Handlungssteuerung.

5.3.2. Umsetzung der Sensorik

In Abschnitt 4.3.2 wurden die wesentlichen Konzepte zur Interaktion mit der Montageumgebung dargestellt. Dabei ermöglicht die sensorische Erfassung der Veränderungen in der Montageumgebung eine adäquate Reaktion des kognitiven Informationsassistenzsystems und damit die Unterstützung des Werkers. Die im Vorfeld durchgeführten Arbeiten [AB16; AB15a; AB15b; BA14; AB14] bestätigten einen minimalistischen Ansatz zur Instrumentierung der Arbeitsumgebung mit Sensoren.

Daher wurde der Werker durch eine RFID-Chipkarte identifiziert, Werkzeuge und teilweise auch Bauteile wurden ebenfalls mit RFID-Sendern ausgestattet. Das verfügbare sowie verwendete Material wurde über FSR-basierte Gewichts- bzw. Drucksensoren gezählt.

In den folgenden Abschnitten wird die umgesetzte Vorverarbeitung und Interpretation der sensorischen Daten im Überblick erläutert.

Sensorische Erfassung von Ereignissen

Die wertmäßige Ermittlung der Sensorwerte erfolgt bei Drucksensoren und dem RFID-Reader unterschiedlich. Die Drucksensoren liefern ein analoges Spannungssignal im Wertebereich von 0 - 5 Volt. Aus dieser Spannung muss zunächst ein diskreter Druckwert ermittelt werden. Diese Verarbeitung erfolgt auf dem Arduino MEGA ADK (siehe Codebeispiel 5.1). Dabei werden für jeden Drucksensor vier aufeinanderfolgende Spannungswerte eingelesen und daraus das Spannungsmittel berechnet. Anschließend wird dieser Wert auf einen digitalen Zahlenwert aus dem Bereich 0 - 1023 abgebildet. Das Ergebnis wird über die serielle USB-Schnittstelle ausgegeben.

```
1 void loop() {
2     for ( int i = MIN_ANALOG; i < MAX_ANALOG; i++ ) {
3         avgRead = (analogRead(i) + analogRead(i) + analogRead(i) +
4             analogRead(i) ) / 4;
5         sensorValue = map(avgRead, 0, 1023, 0, 5000);
6         Serial.println(sensorValue);
7     }
8 }
```

Listing 5.1: In einer Schleife werden die analogen Werte der Drucksensoren auf digitale Werte abgebildet und über die serielle USB-Schnittstelle weitergegeben (Code in C).

Aus den ermittelten diskreten Sensorwerten werden im Anschluss mittels einer Fensterfunktion die Druckveränderungen errechnet (siehe Codebeispiel 5.2). Da aufgrund des technischen Aufbaus zwischen den Schalen Seiteneffekte entstehen können, wird aus den Druckveränderungen der Sensorwert mit dem höchsten Druckunterschied ermittelt und weiter verarbeitet.

```
1 while True:
2     for index in range(FSR_MIN, FSR_MAX):
3         force = int(readFromSerial(index))
4         window = valueQueue[index]
5         avg = sum(window) / len(window)
6         delta[index] = force - avg
7         maxDelta = max(delta)
```

Listing 5.2: Berechnung der Druckunterschiede mit einer Fensterfunktion und Ermittlung des Maximums (Code in Python)

Die Vorverarbeitung der Sensorsignale vom RFID-Reader erfolgt in einem parallelen Thread. Der Sensor liefert bei Kontakt die eindeutige Identifikationsbezeichnung

des verwendeten RFID-Tags, z.B. 00000002282A. Dieser muss übertragungsbedingt lediglich um Steuerungszeichen bereinigt werden.

Interpretation der Ereignisse

Aus den vorverarbeiteten Sensordaten sowie den Interaktionsinformationen des Werkers werden die korrespondierenden Ereignisse abgeleitet. Dazu werden drei Ereigniskategorien unterschieden:

- **Werkzeugereignisse** beziehen sich auf den Umgang des Werkers mit seinen Werkzeugen. Das Bereitlegen (*take-tool*) und Entfernen (*remove-tool*) eines Werkzeuges von der Arbeitsfläche wird über den RFID-Sensor erfasst und entsprechend interpretiert.
- **Materialereignisse** beziehen sich auf die Entnahme (*take-material*) und das Hinzufügen (*add-material*) von Material in den zugehörigen Materialschalen. Hierfür werden die Sensordaten der Drucksensoren interpretiert. Eine wertmäßige Druckreduzierung weist auf die Materialentnahme hin, während der Druckanstieg das Hinzufügen von Material anzeigt.
- **Steuerungereignisse** beziehen sich auf die Interaktionen und Entscheidungen des Werkers im Zusammenhang mit dem Plant@Hand Montageassistenzsystem. Dort kann er sich explizit einen Arbeitsgang auswählen (*select-task*) oder die erfolgreiche Ausführung des Arbeitsganges bestätigen (*execute-task*).

Jedes Ereignis wird neben einem Zeitstempel zusätzlich parametrisiert, um so zum Beispiel eine Aussage über das verwendete Werkzeug oder entnommene Material weiterzugeben. Die sechs Ereignisse werden eingesetzt, um das digitale Abbild der Montageumgebung zu aktualisieren. Die weitere Verarbeitung zur Analyse, Entscheidung und Planung erfolgt nach den bereits in Abschnitt 4.3.4 vorgestellten Konzepten sowie gemäß der in Abschnitt 4.4 beschriebenen technologischen Auslegung mit der kognitiven Architektur Soar.

5.3.3. Umsetzung der Visualisierung

Das Plant@Hand Montageassistenzsystem wird über ein berührungsempfindliches Touchdisplay am Arbeitsplatz in den Montageprozess eingebettet. Es leitet den Worker schrittweise und visuell durch die Montage. Dazu wurden die in Abschnitt 4.3.2 erarbeiteten vier Informationsebenen umgesetzt. Der Worker wird hierbei durch eine iterative Informationsvertiefung von einer allgemeinen Übersicht seines Arbeitsvorrates, über eine Detailsicht zu einem ausgewählten Arbeitsgang schließlich in die visuelle Anleitung der Arbeitsschritte geführt. Abbildung 5.6 zeigt die Benutzungsoberfläche des Plant@Hand Montageassistenzsystems während der Anleitung des Workers in einem Arbeitsschritt.

Die Umsetzung des Visualisierungskonzeptes wird nun zusammenfassend beschrieben:



Abbildung 5.6.: Benutzungsoberfläche des Plant@Hand Montageassistenzsystems

- Visualisierung der Arbeitsschritte:** Die Untergliederung des Arbeitsganges in Arbeitsschritte wird in der linken Navigationsleiste dargestellt. Dort kann der Werker abhängig vom gewählten Modus des Assistenzsystems eine Auswahl des nächsten Arbeitsschrittes vornehmen. Die bereits beendeten, aktuellen sowie noch offenen Arbeitsschritte werden hier farblich markiert.
- Visualisierung der Arbeitsanleitung:** Im Zentrum der Visualisierung steht die Arbeit mit dem 3D-Konstruktionsmodell. Dieses zeigt arbeitgangabhängig die perspektivische Darstellung der Montagesituation und hebt aktuelle Bauteile, Bezeichnungen sowie Anmerkungen visuell hervor. Der Werker kann mit der 3D-Visualisierung des Konstruktionsmodells explorativ arbeiten, um so neue Zusammenhänge bezogen auf den Montagegegenstand zu erkunden. Eine automatisierte Textanleitung der prozeduralen Reihenfolge des Arbeitsschrittes wird hier ebenfalls gegeben. Zusätzlich steht eine manuell erstellte Textanweisung zum gesamten Arbeitsschritt zur Verfügung. Bezeichnungen von Bauteilen, Material und Werkzeugen sind farblich hervorgehoben.
- Visualisierung von Anmerkungen:** Ein weiteres Merkmal des Plant@Hand Montageassistenzsystems ist die Unterstützung zur selbständigen Reflektion des Arbeitsprozesses und die Artikulation von Hinweisen oder Verbesserungsvorschlägen. Die dafür vorgesehene Anmerkungsfunktion ist mit dem 3D-Konstruktionsmodell verknüpft, so dass neue Anmerkungen mit einem lokalen Bezug zu Bauteilen und einem semantischen Bezug zum Arbeitsschritt bzw. den verwendeten Materialien und Werkzeugen versehen werden können. Dieser Bezug wird visuell hervorgehoben.

- **Visualisierung der Montageumgebung:** Für jeden Arbeitsschritt müssen physische Veränderungen an der Montageumgebung vorgenommen werden, z.B. die Entnahme von Material oder Bereitstellung von Bauteilen und Werkzeugen. Diese werden im rechten Bildschirmbereich passend zum jeweils aktuellen Arbeitsschritt hervorgehoben und zahlenmäßig aufgeführt. Die Entnahme des Materials aus den Materialschalen hat hier eine direkte visuelle Rückmeldung und Veränderung der Mengen zum Ergebnis.
- **Visualisierung der Intervention:** Im Fall eines Montagefehlers wird die aktuelle Ansicht mit einem roten Warnhinweis überblendet, in welchem der Fehler erläutert und ein Lösungsansatz zur Behebung formuliert wird.

Das Plant@Hand Montageassistenzsystem wird damit zum visuellen Informationswerkzeug für den Werker. Es reduziert die Informationen aus den angeschlossenen, führenden Produktionssystemen wie ERP, MES, BDE bzw. PDM/PLM auf die jeweils relevanten Ausschnitte. Diese werden innerhalb des Arbeitsprozesses visuell bereitgestellt um so die kognitiven Arbeitsprozesse während der Montage zu unterstützen.

5.4. Methodische Umsetzung

Im Rahmen der Konzeption in Abschnitt 4.2 wurden beruhend auf der Idee des informellen und situierten Lernens zwei wesentliche Methoden zur pädagogischen Gestaltung der Zusammenarbeit zwischen dem Werker und dem kognitiven Informationsassistenzsystem während des Montageprozesses erarbeitet: Team Cognition und Cognitive Apprenticeship. In diesem Abschnitt soll die Umsetzung der zuvor erarbeiteten methodischen Konzepte mit ihrem Bezug zu den Aufgaben kognitiver Informationsassistenz im Plant@Hand Montageassistenzsystem zusammenfassend betrachtet werden. Die Grundlage dafür bilden die in [AW15] vorgestellten Überlegungen:

- **Bewusstmachen:** Durch das Bewusstmachen von Zuständen und relevanten Veränderungen der Montageumgebung soll die Fähigkeit des Werkers, diese zu erkennen und sich daran anzupassen bzw. die eigenen Handlungen daran auszurichten, unterstützt werden. Die Umsetzung dieser Aufgabe erfolgt im Plant@Hand Montageassistenzsystem auf mehreren Ebenen. Die iterative Informationsbereitstellung zu aktuellen Montageaufgaben schafft ein Bewusstsein über den Umfang und die Komplexität der durchzuführenden Arbeitsgänge und damit ein Gefühl für den erforderlichen Aufwand und die Anforderungen. Durch die situative Bereitstellung und Visualisierung von Informationen während der Ausführung von Arbeitsschritten werden veränderte Zustände und Eigenschaften der Montageumgebung an den Werker kommuniziert. Das Assistenzsystem visualisiert dabei die Änderungen in der Benutzung von Materialien, Bauteilen und Werkzeugen. Das Erkennen von kritischen Zuständen löst eine direkte aktive Intervention des Montageassistenzsystems aus und damit eine Visualisierung, die das Erkennen der Ursache und einen lösungsorientierten Ansatz zur

5. *Plant@Hand Montageassistenz*

Behebung unterstützt. In allen genannten Fällen begleitet das Plant@Hand Montageassistenzsystem den Werker und unterstützt ihn bei der korrekten Einschätzung und Analyse seiner Arbeitssituation.

- **Vorbeugen:** Durch das Vorbeugen von kognitiven Überlastungssituationen soll die Aufmerksamkeit und Gesundheit des Werkers erhalten werden. Das Plant@Hand Montageassistenzsystem verknüpft hierfür die CAM-Konzepte Modellieren und Strukturieren mit der Team Cognition. Es wird auf dieser Basis automatisiert ein kleinschrittiger Arbeitsplan entworfen, der damit die Komplexität umfangreicher Montageaufgaben reduziert und nur unmittelbar relevante Informationen bereitstellt. Die kleinschrittige Anleitung reduziert dabei den kognitiven Aufwand des Werkers bei der Erfassung und Verarbeitung der gestellten Arbeitsaufgabe und begünstigt damit die Vermeidung von Überlastungen.
- **Führen:** Durch das Führen des Werkers in komplexen Arbeitsprozessen soll seine Orientierungsfähigkeit und ein effizientes Arbeiten unterstützt werden. Hier kommen die pädagogischen CAM-Konzepte Modellieren, Anleiten und Strukturieren zusammen mit der Team Cognition zum Einsatz. Das Plant@Hand Montageassistenzsystem ermittelt einen kosten- und zeiteffizienten Arbeitsplan für die Bearbeitung eines Arbeitsganges. Dies passiert sowohl auf der Ebene der Arbeitsschritte als auch auf der Ebene elementarer Prozeduren. Dem Werker wird wahlweise eine feste oder flexible Struktur und Sequenz zur Abarbeitung der Arbeitsschritte vorgegeben. Diese Abstufung unterstützt Anfänger und Fortgeschrittene gleichermaßen.
- **Anleiten:** Durch das Anleiten insbesondere in neuen oder komplexen Arbeitssituation soll eine Verknüpfung zwischen diesen und bis dahin abstrakten Informationen hergestellt werden. Hiermit soll der individuelle Wissenserwerb des Werkers gefördert werden. Neben den bereits zuvor beschriebenen CAM-Ansätzen kommt hier zusätzlich eine Unterstützung durch exploratives Erkunden im Plant@Hand Montageassistenzsystem zum Einsatz. Der Werker kann sich dazu neue Informationen zum Montagegegenstand anhand des interaktiven 3D-Konstruktionsmodells selbständig erarbeiten. Durch die Veränderung des Blickwinkels werden zum Beispiel neue Zusammenhänge bezogen auf die Einbau- und Montagesituation sichtbar. Bauteile können mit zusätzlichem Wissen anderer Werker oder Fachabteilungen versehen sein, die zu neuen Erkenntnissen für den Arbeitsprozess führen. Hierbei steuert die Eigenmotivation des Werkers die Intensität der Exploration.
- **Dokumentieren:** Durch das Dokumentieren des Arbeitsprozesses und der Arbeitsergebnisse wird das Speichern und Erinnern umfangreicher Informationen und Zusammenhänge unterstützt. Das Plant@Hand Montageassistenzsystem dokumentiert die Ausführung der Arbeitsschritte durch den Werker parallel zur Anleitung in der selben feinen Granularität. Auf diese Weise können Daten

direkt an die produktionsführenden Systeme übermittelt werden, die damit eine Feinsteuerung des Montagearbeitsplatzes ermöglichen. Gleichzeitig ist diese Dokumentation für den Werker verfügbar, um damit eine Selbsteinschätzung der eigenen Tätigkeiten zu vereinfachen. Zusätzlich werden die CAM-Konzepte Reflektieren und Artikulieren eingesetzt, um das aktive Auseinandersetzen des Werkers mit dem Arbeitsprozess und dessen Ergebnis zu unterstützen. In Form von Anmerkungen können so gewonnene Erkenntnisse dokumentiert und mit anderen geteilt werden.

- **Überprüfen:** Durch das Überprüfen des Arbeitsprozesses sowie der Arbeitsergebnisse und eine direkte Rückmeldung dazu, soll die Fähigkeit des Werkers zur Selbsteinschätzung und kontinuierlichen Verbesserung unterstützt werden. Dazu wird wiederum eine Verknüpfung zwischen dem Konzept der Team Cognition und dem CAM-Konzept Anleiten im Plant@Hand Montageassistenzsystem hergestellt. Durch die automatisierte Auswertung der sensorisch erfassten Veränderungen der Montageumgebungen werden Rückschlüsse auf mögliche Fehler des Werkers gezogen und diese direkt zurückgemeldet.

Im Plant@Hand Montageassistenzsystem wurden demzufolge die beiden pädagogischen Methoden Team Cognition und Cognitive Apprenticeship eng miteinander verbunden. Das Assistenzsystem übernimmt dabei die Rolle eines anleitenden Experten und führt den Werker durch die Montage. Welchen Einfluss diese automatisierte Form der kognitiven Informationsassistenz auf den Arbeitsprozess und die Arbeitsergebnisse hat wird nun im folgenden Abschnitt durch eine Evaluation des Plant@Hand Montageassistenzsystems mit Probanden untersucht.

5.5. Evaluation des Demonstrators

Im Rahmen der technischen Evaluation wurde unter Laborbedingungen⁴ ein Vergleichstest zwischen dem Plant@Hand Montageassistenzsystem zur Anleitung einer Montageaufgabe und einer klassischen Montageanleitung durchgeführt. Dazu wurden zwei Testgruppen eingeteilt, die sich durch die Reihenfolge in der Arbeit mit einer klassischen Montageanleitung und mit dem Plant@Hand Montageassistenzsystem unterschieden (siehe Abbildung 5.7).

Durch die wechselweise Arbeit mit und ohne kognitivem Informationsassistenzsystem wurden Folgeeffekte von bereits vorhandenem Vorwissen untersucht. Es wurden insgesamt folgende Hypothesen überprüft:

- **H1:** Der Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystems reduziert die Zeit zur kognitiven Verarbeitung der Aufgabenstellung.

⁴Ursprünglich war eine Evaluation unter realen Produktionsbedingungen in einem der analysierten Unternehmen geplant. Durch einen Verkauf des Unternehmens und den damit einhergehenden Umstrukturierungen war die im Rahmen der vorliegenden Arbeit geplante Evaluation nicht mehr möglich.

5. Plant@Hand Montageassistenz

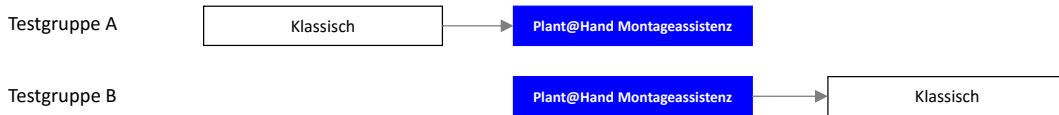


Abbildung 5.7.: Beide Testgruppen arbeiteten in wechselnder Reihenfolge sowohl mit einer klassischen Montageanleitung als auch mit dem Plant@Hand Montageassistenzsystem.

- **H2:** Der Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystems reduziert die Anzahl der Montagefehler.
- **H3:** Der Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystems erhöht den Wirkungsgrad der Montage.

Die Evaluation verwendete das Metallbaukasten-Modell einer Windmühle als Basis. In zwei Testgruppen wurden insgesamt 20 Probanden im Alter zwischen 20 und 50 Jahren mit der Montagevorbereitung zum Anbringen der Rotorblätter an die Drehachse beauftragt. Dazu mussten die erforderlichen Bauteile, Werkzeuge und Materialien identifiziert, aus ihrem Lagerort entnommen und am Arbeitsplatz bereitgestellt werden. Die *Testgruppe A* verwendete zu Beginn die klassische Montageanleitung der Windmühle (siehe Anhang B.2) zur Ausführung dieser Aufgabe und anschließend mit einer Woche Abstand das Plant@Hand Montageassistenzsystem. Die *Testgruppe B* absolvierte die Evaluation in umgekehrter Reihenfolge.

In den folgenden Abschnitten werden der weitere Aufbau sowie die wesentlichen Erkenntnisse der Evaluation in den Testgruppen zusammengefasst. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Ergebnisse bezogen auf die zuvor aufgestellten Hypothesen H1-H3.

5.5.1. Testgruppe A

Die Testgruppe A setzte sich aus 10 Probanden mit einem Altersdurchschnitt von 31,7 Jahren (24 - 47 Jahre) zusammen. Davon waren 77,8 Prozent männlich und 22,2 Prozent weiblich. Durch alle Probanden wurde zunächst eine Montageaufgabe in zwei Durchläufen mit einer klassischen Montageanleitung ausgeführt. Mit einer Woche Abstand wurde die gleiche Aufgabe mit einer leichten Variation (Wechsel von zu verwendendem Material) ebenfalls in zwei Durchläufen mit dem Plant@Hand Montageassistenzsystem ausgeführt.

Klassische Montageanleitung

Es wurden durch die Probanden jeweils zwei Durchläufe der Montageaufgabe nacheinander ausgeführt. Dazu standen alle Bauteile, Werkzeuge und Materialien an einem Lagerort am Arbeitsplatz bereit. Als Informationsmaterial lag die Arbeitsaufgabe sowie eine Montageanleitung am Arbeitsplatz. Während der beiden Durchläufe wurde

die Zeitdauer zur *Aufgabenbearbeitung* sowie die Zeitdauer zur *Informationsbeschaffung* gemessen. Nach jedem Durchlauf wurden die Messungen, das Aufgabenergebnis sowie aufgetretene Fehler in der Aufgabenausführung protokolliert und Nacharbeitszeiten berechnet. Abschließend erfolgte eine Befragung zur gestellten Aufgabe sowie zur Montageanleitung (siehe Anhang B.1). Die wesentlichen Ergebnisse dieser Evaluation in Testgruppe A sind:

- **Informationsanteil:** Im ersten Durchlauf lag der Anteil der Informationsbeschaffung im Vergleich zur Aufgabenausführung bei durchschnittlich 64,7 Prozent, im zweiten Durchlauf reduzierte sich dieser Anteil auf 16 Prozent. Die Hälfte der Probanden führten den zweiten Durchlauf ohne erneute Verwendung des bereitgestellten Informationsmaterials aus (siehe Abbildung 5.8).
- **Fehlerrate:** 78 Prozent der Probanden machten Fehler bei der Ausführung der gestellten Aufgabe. Davon wiederholten alle Probanden ihre Fehler im zweiten Durchlauf. Häufigste Fehlerursache dabei war fehlendes Werkzeug (85,7 Prozent) gefolgt von fehlenden Bauteilen (57,1 Prozent) und falschem Material (28,6 Prozent).
- **Wirkungsgrad:** Der durchschnittliche Wirkungsgrad im ersten Durchlauf lag mit Berücksichtigung der Fehler und der Einberechnung einer entsprechenden Nacharbeit zur Korrektur bei 30,8 Prozent. Im zweiten Durchlauf stieg er auf 69,5 Prozent an.
- **Komplexität:** Die Aufgabe wurde von den Probanden mit 88,9 Prozent mehrheitlich als nicht komplex und nicht schwierig empfunden.
- **Montageanleitung:** Die zur Verfügung gestellte Montageanleitung wurde ebenfalls mit 88,9 Prozent als hilfreich und vom Informationsgehalt ausreichend

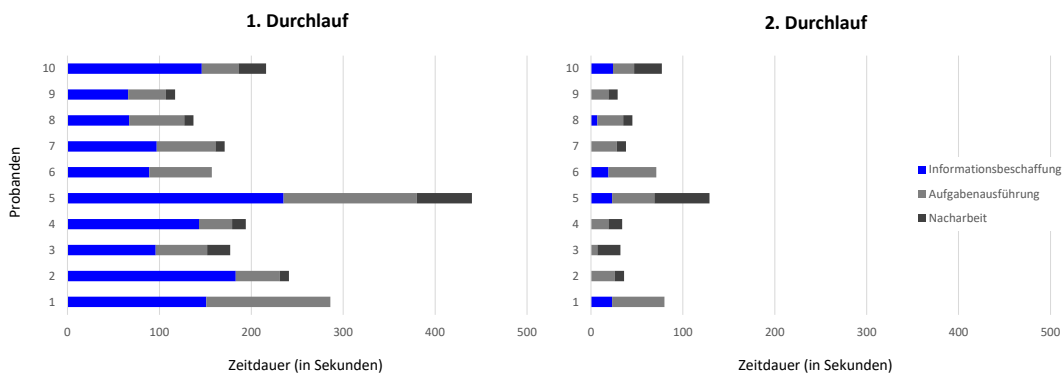


Abbildung 5.8.: Vergleich und Verhältnis der einzelnen Zeitdauern von Informationsbeschaffung (blau), Aufgabenausführung (hellgrau) und Nacharbeit (dunkelgrau) innerhalb der beiden Durchläufe von Testgruppe A mit klassischer Montageanleitung

5. Plant@Hand Montageassistenz

bewertet. Die Kennzeichnung der erforderlichen Werkzeuge (55,6 Prozent) sowie die Beschriftung des Materials (33,3 Prozent) wurden in der Retrospektive als verbesserungswürdig benannt.

In den Ergebnissen der Testgruppe A zeigt sich die hohe Abhängigkeit des Arbeitsergebnisses von den zur Verfügung gestellten Informationen. Obwohl die Montageanleitung als zur Vorbereitung und Ausführung der Aufgabe ausreichend sowie die Aufgabe selbst als nicht komplex empfunden wurde, beweist jedoch die sehr hohe Fehlerrate den Zusammenhang zwischen Fehlern in der Informationsbeschaffung und ihrer Anwendung. Die häufigste Fehlerursache (fehlendes Werkzeug) ist auf eine getrennte Darstellung der benötigten Werkzeuge bezogen auf die Darstellung der erforderlichen Bauteile und Materialien in der Montageanleitung zurückzuführen.

In diesem Zusammenhang ist die hohe Lernkurve der Probanden hervorzuheben, die zur Vorbereitung des zweiten Durchlaufes nicht noch einmal bzw. nur selten auf die Aufgabe bzw. die Montageanleitung zurückgegriffen haben. Dadurch wurden einerseits die selben Fehler wiederholt, andererseits jedoch auch die korrekte Ausführung in den zwei erfolgreichen Bearbeitungsfällen. Dadurch lässt sich die Annahme ableiten, dass durch eine begleitende und korrigierende Anleitung der Arbeitsaufgabe alle Fehler im zweiten Durchlauf vermeidbar gewesen wären.

Plant@Hand Montageassistenzsystem

Die Bearbeitung der Montageaufgabe mit dem Plant@Hand Montageassistenzsystem erfolgte in Testgruppe A eine Woche nach dem ersten Test mit der klassischen Montageanleitung. Das Plant@Hand Montageassistenzsystem wurde dazu über ein Display am Montagearbeitsplatz anstelle der Montageanleitung bereitgestellt. Es wurden auch hier ebenso die Zeiten für die Aufgabenausführung insgesamt sowie für die Informationsbeschaffung erfasst. Anschließend wurde die bereits zuvor im Test durchgeführte Befragung zur Komplexität der Montageaufgabe und der Qualität der Montageanleitung wiederholt.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Evaluation in Testgruppe A sind:

- **Informationsanteil:** Im ersten Durchlauf lag der Anteil der Informationsbeschaffung im Vergleich zur Aufgabenausführung bei durchschnittlich 28,6 Prozent, im zweiten Durchlauf reduzierte sich dieser Anteil auf 26,5 Prozent (siehe Abbildung 5.9).
- **Fehlerrate:** Zwei Probanden machten jeweils einen Fehler im ersten Durchlauf bei der Ausführung der gestellten Aufgabe. Dies entspricht einer Fehlerrate von 20 Prozent. Keiner der beiden Probanden wiederholte den Fehler im zweiten Durchlauf. Fehlerursachen waren hier jeweils zu 50 Prozent falsches Werkzeug und falsches Material.
- **Wirkungsgrad:** Der durchschnittliche Wirkungsgrad im ersten Durchlauf lag mit Berücksichtigung der Fehler und der Einberechnung einer entsprechenden

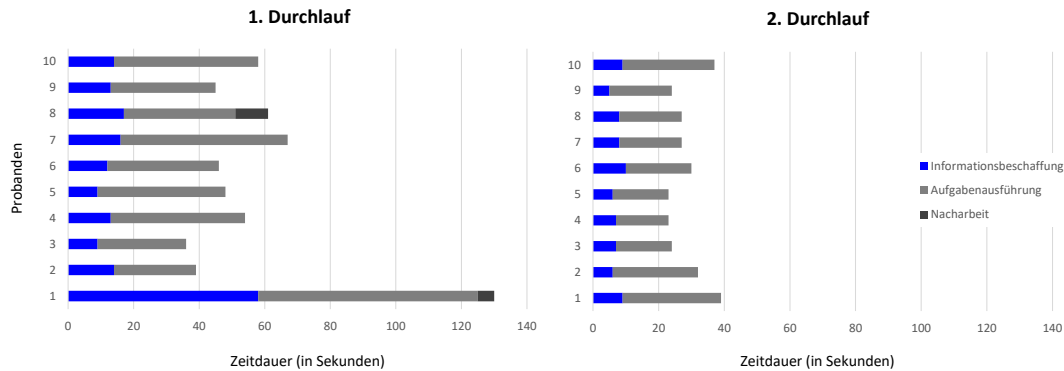


Abbildung 5.9.: Vergleich und Verhältnis der einzelnen Zeitdauern innerhalb der beiden Durchläufe von Testgruppe A mit Plant@Hand Montageassistenzsystem

Nacharbeit zur Korrektur bei 69,5 Prozent. Im zweiten Durchlauf stieg er auf 73,5 Prozent an.

- **Komplexität:** Die Aufgabe wurde von 50 Prozent der Probanden als nicht komplex und von 10 Prozent als eher komplex empfunden. Sie wurde jedoch von 70 Prozent nicht als schwierig bewertet.
- **Montageanleitung:** Die zur Verfügung gestellte Montageanleitung wurde von allen Probanden als hilfreich und vom Informationsgehalt ausreichend bewertet. Die bildliche Kennzeichnung der erforderlichen Werkzeuge sowie die Beschriftung des Materials (30 Prozent) wurden in der Retrospektive als verbesserungswürdig benannt.

Im zweiten Test mit der Testgruppe A zeigt sich die positive Auswirkung des kognitiven Informationsassistenzsystems auf die Bewertungskriterien. Der Anteil der Informationsbeschaffung im Vergleich zur Aufgabenausführung sinkt zwar hier im zweiten Durchlauf nur gering, der Wirkungsgrad befindet sich jedoch bereits im ersten Durchlauf auf sehr hohem Niveau, welches sich noch einmal im zweiten Durchlauf verbessert.

Auch in diesem Test ist ein Lerneffekt zwischen den beiden Durchläufen erkennbar. So sinkt jeweils die Bearbeitungsdauer und der Anteil der Informationsbeschaffung daran. Die Fehlerrate ließ sich parallel durch die direkte Rückmeldung und Intervention des kognitiven Informationsassistenzsystems sogar auf 0 reduzieren.

Auswertung der Testgruppe

Deutlich interessanter ist die Auswertung der Testgruppe A im Vergleich der beiden Tests zueinander. Hier sollen die Fehlerrate, der Wirkungsgrad und die Bearbeitungs-
dauer näher betrachtet werden (siehe Abbildung 5.10).

5. Plant@Hand Montageassistenz

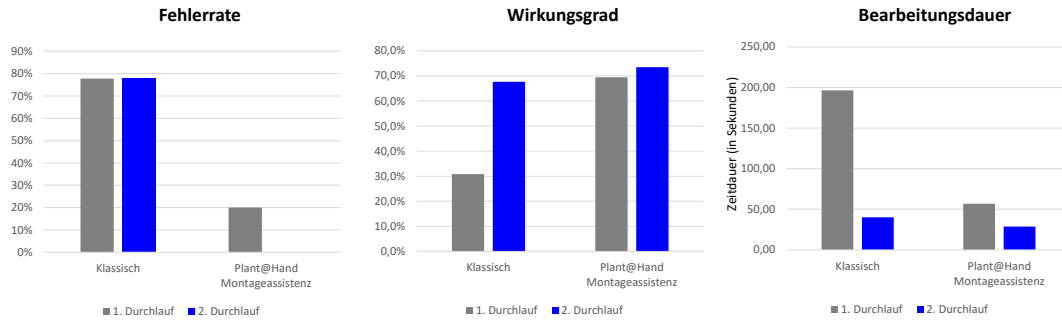


Abbildung 5.10.: Wesentliche Ergebnisse der Testgruppe im Vergleich zwischen klassischer Montageanleitung und Plant@Hand Montageassistenz

Während mit der klassischen Montageanleitung alle Fehler identisch im zweiten Durchlauf wiederholt wurden, wurde mit dem Einsatz des Plant@Hand Montageassistenzsystems kein Fehler wiederholt. Die Ursache ist hierfür in der Intervention des kognitiven Informationsassistenzsystems zu suchen. Durch sofortiges Korrigieren der Fehler, wird die richtige Handlungsweise gezeigt und eingeprägt. Der Einfluss von bereits vorhandenem Vorwissen kann hier vernachlässigt werden, da sich ansonsten die hohe Fehlerrate aus dem Test mit der klassischen Montageanleitung stärker in den Testergebnissen mit dem kognitiven Informationsassistenzsystem bemerkbar gemacht hätten.

Der Wirkungsgrad lässt sich ebenfalls durch den Einsatz kognitiver Informationsassistenz optimieren. Hier fällt insbesondere der hohe Wirkungsgrad bei erstmaligem Ausführen der Montageaufgabe mit dem kognitiven Informationsassistenzsystem auf. Dies kann auf zwei Ursachen zurückzuführen sein. Einerseits erfordert die enge Führung des Probanden keine umfangreiche kognitive Auseinandersetzung mit der Montageaufgabe und andererseits kann das allgemeine Vorwissen über die Aufgabe aus dem ersten Test hier noch die Ausführung beeinflussen. Dieser Zusammenhang wird durch die umgekehrte Reihenfolge in Testgruppe B jedoch weiter überprüft.

Die Bearbeitungsdauer zeigt ein ähnliches Verhältnis der beiden Tests zueinander (siehe Abbildung 5.11). Während die erstmalige Auseinandersetzung mit der Montageaufgabe im ersten Test mit klassischer Montageanleitung einen sehr großen Anteil der Zeit (64,7 Prozent) in Anspruch genommen hat, sinkt dieser im zweiten Durchlauf jedoch stark ab (auf 16 Prozent). Dies entspricht einer Reduzierung des Anteils zur Informationsbeschaffung um 75,3 Prozent. Hier kann deutlich auf einen Lerneffekt geschlossen werden. Die Handlungen aus dem ersten Durchlauf werden durch die intensive kognitive Auseinandersetzung eingeprägt und im zweiten Durchlauf rekapituliert. Durch das Einprägen der falschen Handlungen wurden so jedoch auch alle Fehler wiederholt.

Der Lerneffekt bei Einsatz des kognitiven Informationsassistenzsystems fällt im Vergleich dazu deutlich geringer aus. Vom ersten zum zweiten Durchlauf reduziert sich der Anteil zur Informationsbeschaffung nur um 7,4 Prozent. Gleichzeitig hat keiner der Probanden die Aufgabe aus dem Gedächtnis heraus nachgearbeitet. Im Gegenteil

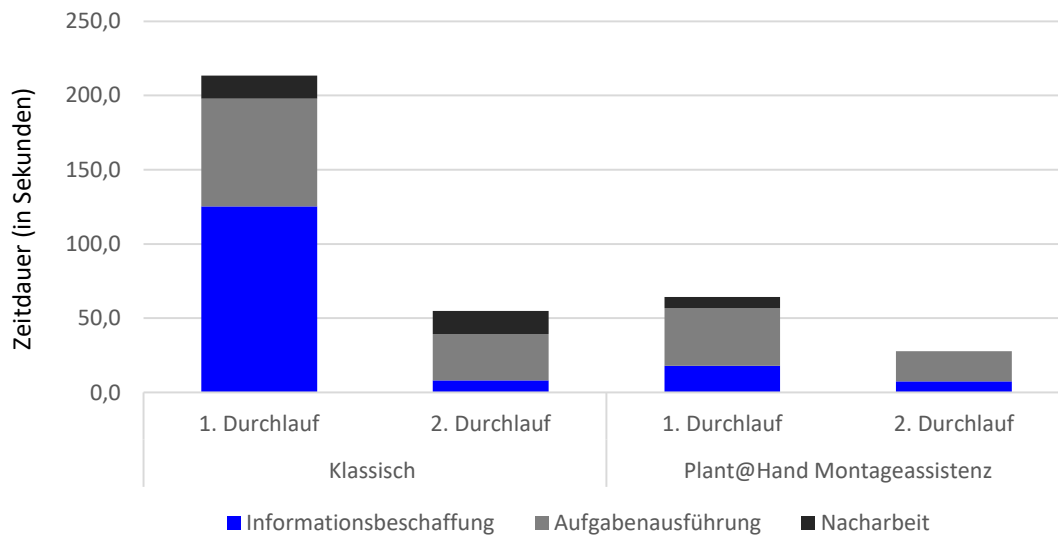


Abbildung 5.11.: Zusammensetzung der Bearbeitungszeitdauer aus Informationsbeschaffung (blau), Aufgabenausführung (hellgrau) und Nacharbeit (dunkelgrau)

wurde eine kontinuierliche Absicherung der Aufgabenausführung durch Vergleich mit den Anweisungen des Plant@Hand Montageassistentzsystems beobachtet.

Mit Blick auf die retrospektiv erhobene subjektive Wahrnehmung der durchgeführten Aufgabenstellung zeigte sich, dass von den Probanden die zunächst mit klassischer Montageanleitung durchgeführte Aufgabe durchschnittlich als weniger komplex empfunden wurde. Der Schwierigkeitsgrad wurde jedoch in beiden Ansätzen als vergleichbar angegeben.

In der Bewertung der Testgruppe A können anhand der zuvor diskutierten Ergebnisse folgende Feststellungen getroffen werden:

1. Der Einsatz des kognitiven Informationsassistentzsystems hat zu einer Reduzierung der Fehlerrate geführt.
2. Der Einsatz des kognitiven Informationsassistentzsystems hat zu einem Erlernen der richtigen Arbeitsschritte geführt.

Der Zusammenhang zwischen dem Einsatz des kognitiven Informationsassistentzsystems und dem Wirkungsgrad, der Bearbeitungszeit bzw. der kognitiven Verarbeitung der Montageaufgabe muss durch die Ergebnisse in Testgruppe B weiter untersucht werden.

5.5.2. Testgruppe B

Die Testgruppe B setzte sich ebenfalls aus 10 Probanden mit einem ähnlichen Altersdurchschnitt von 32,7 Jahren (20-50 Jahren) zusammen. In dieser Gruppe entsprach

5. *Plant@Hand Montageassistenz*

das Verhältnis der männlichen zu den weiblichen Probanden der Testgruppe A. Durch die Testgruppe B wurde die von Testgruppe A bekannte Montageaufgabe in umgekehrter Testreihenfolge ausgeführt. Zunächst wurde das Plant@Hand Montageassistenzsystem und eine Woche später die klassische Montageanleitung zur Unterstützung eingesetzt. Es wurden jeweils wieder zwei Durchläufe zur Beobachtung kurzfristiger Effekte vorgenommen.

Plant@Hand Montageassistenzsystem

Die Bearbeitung der Montageaufgabe mit dem Plant@Hand Montageassistenzsystem erfolgte in Testgruppe B nach dem gleichen Verfahren wie in Testgruppe A. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Evaluation in Testgruppe B sind:

- **Informationsanteil:** Im ersten Durchlauf lag der Anteil der Informationsbeschaffung im Vergleich zur Aufgabenausführung bei durchschnittlich 35,1 Prozent, im zweiten Durchlauf reduzierte sich dieser Anteil auf 23,9 Prozent (siehe Abbildung 5.12).
- **Fehlerrate:** Zwei Probanden machten jeweils einen Fehler im ersten Durchlauf bei der Ausführung der gestellten Aufgabe. Dies entspricht einer Fehlerrate von 20 Prozent. Keiner der beiden Probanden wiederholte den Fehler im zweiten Durchlauf. Fehlerursache war in beiden Fällen falsches Werkzeug.
- **Wirkungsgrad:** Der durchschnittliche Wirkungsgrad im ersten Durchlauf lag mit Berücksichtigung der Fehler und der Einberechnung einer entsprechenden Nacharbeit zur Korrektur bei 63,6 Prozent. Im zweiten Durchlauf stieg er auf 76,1 Prozent an.
- **Komplexität:** Die Aufgabe wurde von 60 Prozent der Probanden als nicht komplex und von 40 Prozent als eher komplex empfunden. Ebenso wurde sie von 80 Prozent nicht als schwierig bewertet.
- **Montageanleitung:** Die zur Verfügung gestellte Montageanleitung wurde von allen Probanden als hilfreich und vom Informationsgehalt ausreichend bewertet. Die bildliche Kennzeichnung der erforderlichen Werkzeuge sowie die Beschriftung des Materials (30 Prozent) wurden in der Retrospektive als verbesserungswürdig benannt.

Im zweiten Test mit der Testgruppe B ist ebenfalls eine positive Auswirkung des kognitiven Informationsassistenzsystems auf die Bewertungskriterien erkennbar. Der Anteil der Informationsbeschaffung im Vergleich zur Aufgabenausführung sinkt im zweiten Durchlauf um 31,9 Prozent, während sich der Wirkungsgrad um 19,5 Prozent verbessert.

Zwischen beiden Durchläufen ist wiederum ein Lerneffekt erkennbar. Die Bearbeitungsdauer sinkt um 52,5 Prozent während der Anteil der Informationsbeschaffung daran sich sogar um 69 Prozent reduziert. Die Fehlerrate ließ sich durch die direkte

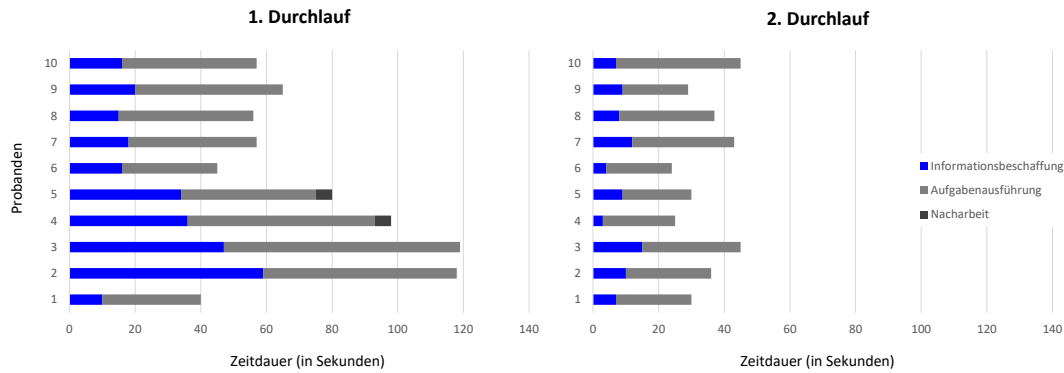


Abbildung 5.12.: Vergleich und Verhältnis der einzelnen Zeitdauern innerhalb der beiden Durchläufe von Testgruppe B mit Plant@Hand Montageassistenzsystem

Rückmeldung und Intervention des kognitiven Informationsassistenzsystems vom 20 Prozent im ersten Durchlauf auf 0 Prozent im zweiten Durchlauf reduzieren.

Klassische Montageanleitung

Die Bearbeitung der Montageaufgabe mit der klassischen Montageanleitung erfolgte in Testgruppe B eine Woche nach dem ersten Test mit dem Plant@Hand Montageassistenzsystem. Es wurde hierfür der gleiche Testaufbau und Befragungsablauf wie für die Testgruppe A eingesetzt. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Evaluation in Testgruppe B sind:

- **Informationsanteil:** Im ersten Durchlauf lag der Anteil der Informationsbeschaffung im Vergleich zur Aufgabenausführung bei durchschnittlich 72,9

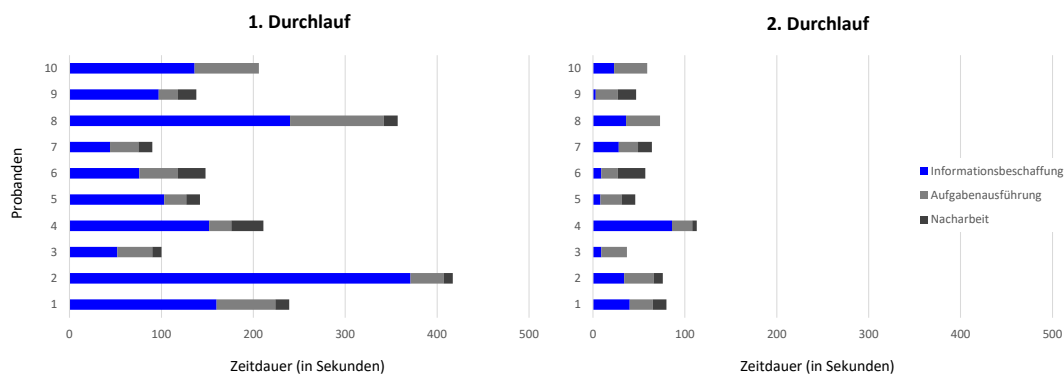


Abbildung 5.13.: Vergleich und Verhältnis der einzelnen Zeitdauern innerhalb der beiden Durchläufe von Testgruppe A mit Plant@Hand Montageassistenzsystem

5. Plant@Hand Montageassistenz

Prozent, im zweiten Durchlauf reduzierte sich dieser Anteil auf 43,3 Prozent (siehe Abbildung 5.13).

- **Fehlerrate:** 9 Probanden machten Fehler im ersten Durchlauf bei der Ausführung der gestellten Aufgabe. Dies entspricht einer Fehlerrate von 90 Prozent. Von diesen wiederholten 7 Probanden ihre Fehler im zweiten Durchlauf.
- **Wirkungsgrad:** Der durchschnittliche Wirkungsgrad im ersten Durchlauf lag mit Berücksichtigung der Fehler und der Einberechnung einer entsprechenden Nacharbeit zur Korrektur bei 22,7 Prozent. Im zweiten Durchlauf stieg er auf 53 Prozent an.
- **Komplexität:** Die Aufgabe wurde von 70 Prozent der Probanden als nicht komplex und von 20 Prozent als eher komplex empfunden. Sie wurde von 70 Prozent nicht als schwierig bewertet.
- **Montageanleitung:** Die zur Verfügung gestellte Montageanleitung wurde von allen Probanden als hilfreich und vom Informationsgehalt ausreichend bewertet. Die bildliche Kennzeichnung der erforderlichen Werkzeuge sowie die Beschriftung des Materials (30 Prozent) wurden in der Retrospektive als verbesserungswürdig benannt.

Die Ergebnisse der Testgruppe B weisen im zweiten Test Ähnlichkeiten mit dem ersten Test der Testgruppe A auf. Der Anteil der Informationsbeschaffung an der Bearbeitungsdauer nahm im zweiten Durchlauf um 40,7 Prozent ab. Gleichzeitig kann die Fehlerrate jedoch nur gering reduziert werden. Dadurch erhöhte sich der Wirkungsgrad um 57,2 Prozent im Vergleich zum ersten Durchlauf.

Wie bereits in den anderen Tests festgestellt, kann auch in diesem Durchlauf ein Lerneffekt zwischen dem ersten und zweiten Durchlauf erkannt werden. Dieser macht sich durch die Reduzierung des Anteils der Informationsbeschaffung und in zwei Fällen sogar durch das selbständige Erkennen von Fehlern im ersten Durchlauf bemerkbar.

Auswertung der Testgruppe

In dieser Testgruppe wurde zunächst das Plant@Hand Montageassistenzsystem zur Anleitung der Arbeitsaufgabe und anschließend die klassische Montageanleitung eingesetzt. Werden wiederum die Bewertungskriterien Fehlerrate, Wirkungsgrad sowie Bearbeitungsdauer im Vergleich der beiden Tests zueinander betrachtet (siehe Abbildung 5.14), können die Effekte der kognitiven Informationsassistenz auf den Arbeitsprozess abgeleitet werden.

Durch die kleinschrittige Anleitung der Arbeitsaufgabe mit dem Plant@Hand Montageassistenzsystem konnte bereits in der erstmaligen Ausführung eine sehr geringe Fehlerrate (20 Prozent) erreicht werden. Die direkte Rückmeldung des Systems im Fall eines Fehlers führte zu einer schnellen Einprägung und im zweiten Durchlauf wurden diese Fehler bereits vermieden. Obwohl jedoch nach einer Woche die Arbeitsaufgabe

in einer nahezu identischen Konfiguration mit der klassischen Montageanleitung wiederholt wurde, stieg die Fehlerrate jedoch deutlich auf 90 Prozent an. Dabei lag die gestiegene Fehlerrate nicht an der variierten Ausführung der Arbeitsaufgabe, da auch identische Aufgabenteile fehlerhaft ausgeführt wurden.

Der Wirkungsgrad liegt mit dem Einsatz des Plant@Hand Montageassistenzsystem messbar höher im Vergleich zur klassischen Montageanleitung. Während der Unterschied hier im jeweils ersten Durchlauf sogar 41 Prozentpunkte ausmacht, sind es im jeweils zweiten Durchlauf immer noch 23,1 Prozentpunkte. Hier erweist sich die detaillierte Führung durch den Arbeitsprozess insbesondere für unbekannte bzw. erstmalig ausgeführte Arbeitsaufgaben als ein geeignetes Mittel zur Unterstützung und Qualitätssicherung. Diese Aussage lässt sich anhand der Analyse der Bearbeitungsdauer bestätigen. Mit Verwendung des Plant@Hand Montageassistenzsystem liegt die Bearbeitungsdauer um 61,5 Prozent im ersten und 36,5 Prozent im zweiten Durchlauf unterhalb der durchschnittlichen Bearbeitungsdauer ohne Einsatz dieses Systems.

Die genauere Betrachtung der Verhältnisse (siehe Abbildung 5.15) zwischen den durchschnittlichen Zeiten zur Informationsbeschaffung, zur Aufgabenausführung und für mögliche Nacharbeiten zeigt die wesentliche Ursache für die Unterschiede im Einsatz mit und ohne Plant@Hand Montageassistenzsystem. Während die durchschnittliche Zeit für die Aufgabenausführung nahezu identisch im Vergleich der jeweils ersten und zweiten Durchläufe bleibt, steigt die durchschnittliche Zeit zur Informationsbeschaffung im ersten Durchlauf auf ein fünffaches und im zweiten auf ein dreifaches der Werte mit kognitiver Informationsassistenz an. Ebenso steigt die fehlerbedingte Zeit für Nacharbeiten an.

Auch in dieser Testgruppe ist ein Lerneffekt zwischen beiden Durchläufen erkennbar. Dieser lässt sich einerseits aus der Betrachtung der Zeit zur Informationsbeschaffung ableiten und fällt bei Einsatz des Plant@Hand Montageassistenzsystem um 37,7 Prozent geringer aus im Vergleich zur Arbeit mit der klassischen Montageanleitung. Hier erfordert die nicht vorhandene explizite Anleitung des Arbeitsprozesses eine intensivere kognitive Auseinandersetzung mit der gestellten Aufgabe und daher ein

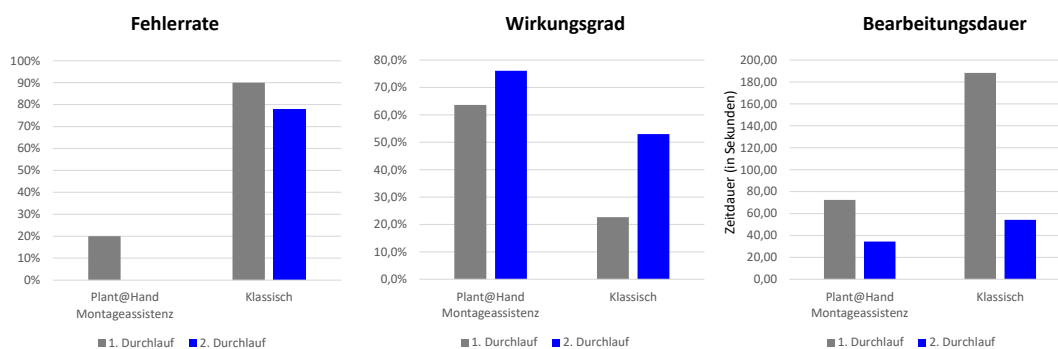


Abbildung 5.14.: Wesentliche Ergebnisse der Testgruppe im Vergleich zwischen Plant@Hand Montageassistenz und klassischer Montageanleitung

5. Plant@Hand Montageassistenz

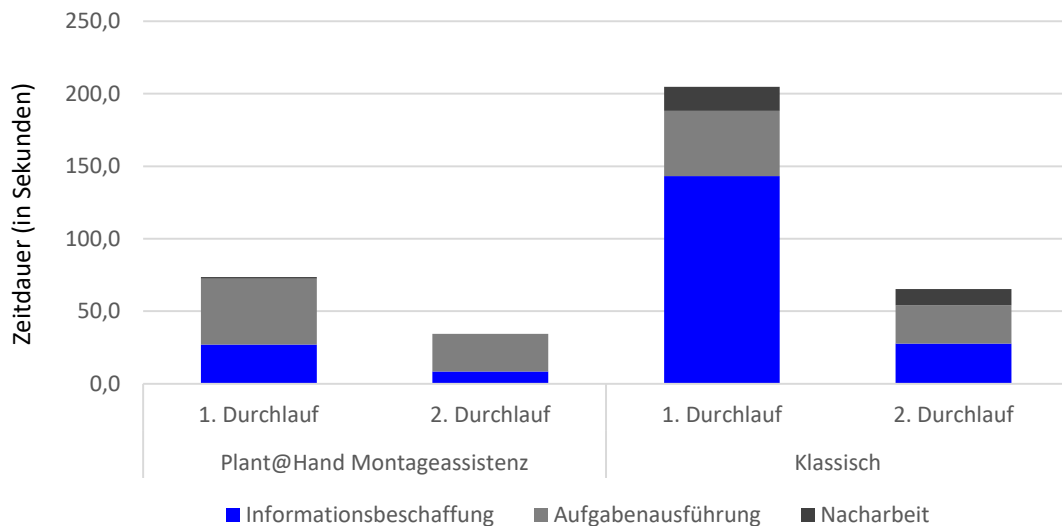


Abbildung 5.15.: Zusammensetzung der Bearbeitungszeitdauer aus Informationsbeschaffung (blau), Aufgabenausführung (hellgrau) und Nacharbeit (dunkelgrau)

intensiveres situatives Lernen der Arbeitsschritte. Das fehlende Feedback bei Fehlern verhindert jedoch kaum die Wiederholung der Fehler aus dem ersten Durchlauf. Der Einsatz des Plant@Hand Montageassistenzsystems verstärkt jedoch das Erlernen der richtigen Ausführung der Arbeitsschritte. Fehler werden nicht wiederholt.

Bei der Auswertung der retrospektiven Befragung der Probanden nach Durchführung der Durchläufe wird deutlich, dass in dieser Testgruppe durch den vorangegangenen Einsatz des Plant@Hand Montageassistenzsystems die Erwartungshaltung an die klassische Montageanleitung gesteigert wurde. So wurden in dieser wesentliche Informationen im direkten Vergleich vermisst.

Anhand dieser Betrachtungen und Ergebnisse für die Testgruppe B können zusätzlich zu den bereits erfolgten Feststellungen in Abschnitt 5.5.1 folgende Ergänzungen getroffen werden:

1. Der Einsatz des kognitiven Informationsassistenzsystems reduziert die Zeit zur Beschaffung und kognitiven Verarbeitung der Arbeitsaufgaben.
2. Der Einsatz des kognitiven Informationsassistenzsystems verstärkt nicht das Erlernen der Reihenfolge der Arbeitsschritte, jedoch der richtigen Ausführung dieser.

Um hier den Effekt des situativen Lernens im Zusammenhang mit der gestellten Arbeitsaufgabe und der Reihenfolge der Verwendung von kognitiven Informationsassistenzsystem und klassischer Montageanleitung zu betrachten, sollen im folgenden Abschnitt die Ergebnisse der beiden Testgruppen A und B miteinander verglichen werden.

5.5.3. Vergleich der Testgruppen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Ergebnisse der durchgeführten Tests bezogen auf die einzelnen Testgruppen A und B einzeln betrachtet. Für eine Bewertung dieser Ergebnisse bezüglich der eingangs formulierten Hypothesen ist jedoch eine tiefergehende quantitative Betrachtung der beiden Testgruppen zueinander erforderlich.

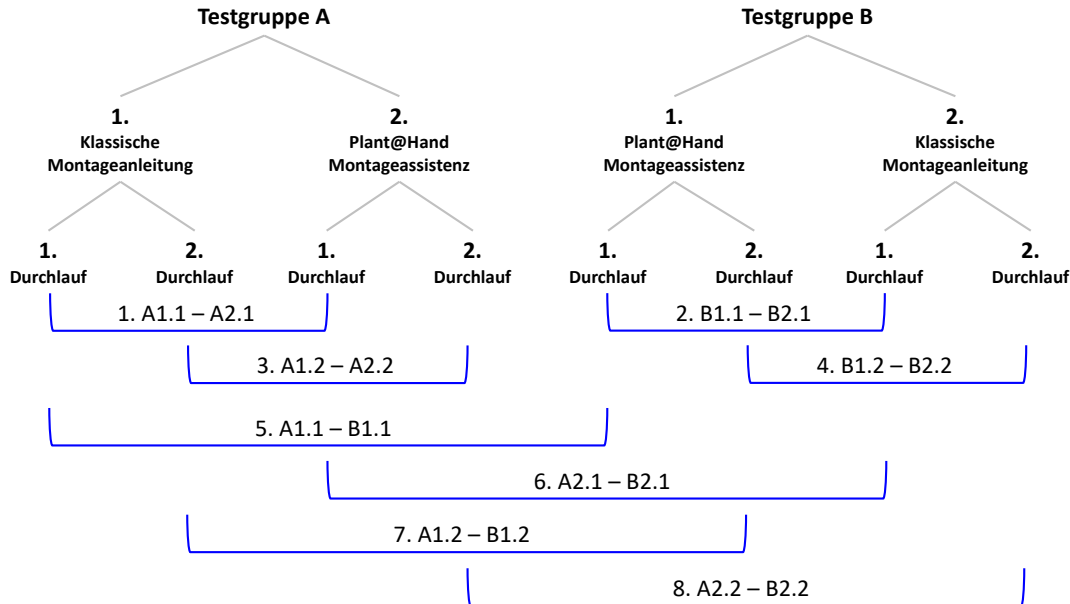


Abbildung 5.16.: Die Signifikanz der zuvor dargestellten Ergebnisse und ihre Bedeutung bzgl. der aufgestellten Hypothesen wird mit Hilfe von t-Tests auf den Stichproben der unterschiedlichen Durchläufe in beiden Testgruppen ermittelt.

Zur quantitativen Überprüfung der Hypothesen H1 - H3 werden in den folgenden Abschnitten die Ergebnisse der Durchläufe in den Testgruppen nach dem in Abbildung 5.16 dargestellten Muster verglichen. Dazu wird als Bewertungsmethode das parametrische *t-Test-Verfahren* herangezogen, welches zwei abhängige bzw. unabhängige Stichproben auf die unterschiedliche Ausprägung eines Merkmals untersucht [Ras+10]. Dazu wird jede einzelne inhaltliche Hypothese in eine statistische Hypothese überführt und auf dieser Basis die Annahme oder Ablehnung dieser über einen Vergleich der Stichprobenmittelwerte herbeigeführt. Der t-Test berechnet dazu die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der aufgetretenen Mittelwertdifferenz (*p-Wert*) und hilft damit bei der Entscheidung ob Zufall oder ein systematischer Effekt vorliegt. Gilt für den errechneten p-Wert hierbei $p < 0,05$, also eine Wahrscheinlichkeit von weniger als 5 Prozent, kann von einem statistisch signifikanten Unterschied der Stichproben und damit der Testgruppen ausgegangen werden. Gilt $p < 0,001$ liegt sogar ein statistisch hochsignifikanter Unterschied vor.

5. Plant@Hand Montageassistenz

Das t-Test-Verfahren lässt sich nur auf Stichproben normalverteilter Populationen ermitteln [SH06]. Aus diesem Grund wurde im Vorfeld ein *Kolmogorov-Smirnov-Test* (KS-Test) zur Absicherung der Normalverteilung der verwendeten Stichproben eingesetzt.

Die folgenden Abschnitte analysieren die Hypothesen nun anhand der beschriebenen Bewertungsmethodik.

Hypothese 1 - Kognitive Informationsverarbeitung

Die erste Hypothese geht von der Annahme aus, dass durch Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystems die Zeit des Werkers zur kognitiven Verarbeitung der Arbeitsaufgabe reduziert wird. In der Testdurchführung wurde dazu die Zeitdauer für das gezielte Informieren zur gestellten Aufgabe gemessen und anschließend ausgewertet. Aus dem Vergleich der Stichproben der unterschiedlichen Testdurchläufe mit dem t-Test ergeben sich die in Tabelle 5.1 dargestellten p-Werte und Signifikanzen für einen Unterschied der Stichproben.

Tabelle 5.1.: Die Berechnung der p-Werte mit dem t-Test zeigt eine überwiegende Annahme der Hypothese 1 im Vergleich der unterschiedlichen Testdurchläufe (Stichproben) zueinander.

Stichproben	p-Wert	Bewertung
1. A1.1 - A2.1	$7,12 * 10^{-5}$	hochsignifikant
2. B1.1 - B2.1	$1,75 * 10^{-3}$	signifikant
3. A1.2 - A2.2	0,269	nicht signifikant
4. B1.2 - B2.2	0,023	signifikant
5. A1.1 - B1.1	$9,45 * 10^{-5}$	hochsignifikant
6. A2.1 - B2.1	$1,49 * 10^{-3}$	signifikant
7. A1.2 - B1.2	0,376	nicht signifikant
8. A2.2 - B2.2	0,014	signifikant

Es wird hierbei deutlich, dass sich Hypothese 1 für sechs von acht Gruppenvergleichen bestätigt und teilweise sogar eine hohe Signifikanz vorliegt. In zwei Fällen (3. und 7.) ist der Unterschied nicht signifikant und die Hypothese muss hierfür abgelehnt werden. In diesen Fällen wird jeweils der zweite Durchlauf mit klassischer Montageanleitung, die zu Beginn verwendet wird, mit dem nachfolgenden (3.) bzw. dem erstmaligen zweiten Durchlauf (7.) mit kognitivem Montageassistenzsystem

verglichen. Aus den erzielten p-Werten lässt sich schlussfolgern, dass mit 26,9 Prozent bzw. 37,6 Prozent Wahrscheinlichkeit ähnliche Ergebnisse mit der klassischen Montageanleitung erreicht werden können. Dieser Effekt lässt sich durch das intensive Auseinandersetzen des Probanden mit der bis dahin unbekannten klassischen Montageanleitung im ersten Durchlauf und die daraus resultierende starke Erinnerungsleistung erklären, die zu einer vergleichbar hohen Reduzierung der Zeit für die Informationsbeschaffung führte.

Um nicht nur die absolute Zeiteinsparung sondern auch ihren Anteil an der Gesamtzeit der Aufgabenbearbeitung zu betrachten, wurden hierfür in Tabelle 5.2 die entsprechenden p-Werte und Signifikanzen zusammen getragen.

Tabelle 5.2.: Bezogen auf die relative Zeiteinsparung durch den Einsatz des Plant@Hand Montageassistenzsystems kann insbesondere für neue und wechselnde Aufgaben ein deutlicher Effekt aus den p-Werten und Signifikanzen geschlussfolgert werden.

Stichproben	p-Wert	Bewertung
1. A1.1 - A2.1	$1,68 * 10^{-5}$	hochsignifikant
2. B1.1 - B2.1	$5,71 * 10^{-7}$	hochsignifikant
3. A1.2 - A2.2	0,057	gering signifikant
4. B1.2 - B2.2	0,019	signifikant
5. A1.1 - B1.1	$1,21 * 10^{-6}$	hochsignifikant
6. A2.1 - B2.1	$1,68 * 10^{-8}$	hochsignifikant
7. A1.2 - B1.2	0,116	nicht signifikant
8. A2.2 - B2.2	0,015	signifikant

Bei der Analyse dieses Vergleichs schwächt sich der zuvor beobachtete Effekt etwas ab. Im Vergleich des zweiten Durchlaufs mit klassischer Montageanleitung zum kognitiven Informationsassistenzsystem liegt so ebenfalls eine geringe Signifikanz zugunsten der relativen Zeiteinsparung mit dem Plant@Hand Montageassistenzsystem an der Grenze zur Annahme von Hypothese 1 vor.

Wird der jeweils erstmalige Einsatz der klassischen Montageanleitung mit dem kognitiven Informationsassistenzsystem verglichen, kann eine deutliche relative Zeiteinsparung im ersten Durchlauf (5.) zugunsten der kognitiven Informationsassistenz gegenüber einer gering stärkeren Ausprägung der Erinnerungsleistung im zweiten Durchlauf (7.) bei klassischer Montageanleitung festgestellt werden.

Damit lässt sich Hypothese 1 annehmen. Insbesondere gilt sie für stetig wechselnde

5. Plant@Hand Montageassistenz

bzw. neue Aufgaben, wie sie zum Beispiel in einer Unikatfertigung vorzufinden sind. Für sich wiederholende Arbeitsaufgaben, die durch den Werker gut erinnert werden können, kann bezogen auf die absolute und relative Zeiteinsparung nur ein geringer Effekt des kognitiven Informationsassistenzsystems angenommen werden. Hierfür sind jedoch weitere Untersuchungen mit deutlich mehr Iterationen erforderlich, um fundierte Aussagen dazu treffen zu können.

Hypothese 2 - Fehlerrate

Mit Hypothese 2 wird angenommen, dass sich durch den Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystems die Fehlerrate reduziert. Die bisherigen Auswertungen bestätigen diese Hypothese. Eine Analyse der Signifikanz soll jedoch auch hier die Ausprägung dieser Aussage untersuchen. Dazu werden in Tabelle 5.3 die dazugehörigen p-Werte und Signifikanzen für die jeweiligen Vergleiche zusammen getragen.

Tabelle 5.3.: Für die Reduzierung der Fehlerrate durch den Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystems lässt ebenso sich eine statistische Signifikanz der Ergebnisse nachweisen.

Stichproben	p-Wert	Bewertung
1. A1.1 - A2.1	0,015	signifikant
2. B1.1 - B2.1	$2,50 * 10^{-4}$	hochsignifikant
3. A1.2 - A2.2	0,007	signifikant
4. B1.2 - B2.2	0,003	signifikant
5. A1.1 - B1.1	0,009	signifikant
6. A2.1 - B2.1	$4,57 * 10^{-4}$	hochsignifikant
7. A1.2 - B1.2	0,007	signifikant
8. A2.2 - B2.2	0,003	signifikant

In allen Vergleichen wird die Hypothese 2 bestätigt. Hierbei wird insbesondere der große Effekt der Gewöhnung an das kognitive Informationsassistenzsystem aus den Vergleichen 2 und 6 deutlich. In beiden Fällen wird die Fehlerrate mit klassischer Montageanleitung mit dem Einsatz des Plant@Hand Montageassistenzsystem verglichen, nachdem zuvor bereits mit dem kognitiven Informationsassistenzsystem gearbeitet wurde. Es liegt jeweils eine deutliche Signifikanz für einen Unterschied der Stichproben vor, d.h. die Fehlerrate ohne kognitiver Informationsassistenz liegt in beiden Fällen deutlich signifikant über den Werten, die mit Unterstützung erreicht

werden können. Daraus lässt sich eine Gewöhnung des Probanden an die Führung und Kontrolle durch das kognitive Informationsassistenzsystem und die damit vorgegebenen Strukturen und Schritte schließen, die ohne Assistenz wegfallen und somit zu deutlich mehr Fehlern führen.

Anhand dieser Betrachtungen lässt sich somit die Hypothese 2 mit der durchgeführten Evaluation bestätigen.

Hypothese 3 - Wirkungsgrad

In Hypothese 3 wird angenommen, dass durch den Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystems der Wirkungsgrad der Aufgabenbearbeitung und damit der Montage erhöht wird. Dieser Zusammenhang soll nun näher durch eine Auswertung der t-Tests auf Basis der Stichproben aus den unterschiedlichen Durchläufen in beiden Testgruppen betrachtet werden. Hierzu werden die p-Werte und Signifikanzen für den Vergleich des Wirkungsgrades nach dem bereits zuvor angewendeten Verfahren und Muster in Tabelle 5.4 zusammen getragen.

Tabelle 5.4.: Auf Basis der durchgeführten t-Tests liegen teilweise hohe Signifikanzen zugunsten einer Annahme von Hypothese 3 vor. Nur in einem Fall (3.) lässt sich eine geringe Signifikanz der Ergebnisse attestieren.

Stichproben	p-Wert	Bewertung
1. A1.1 - A2.1	$6,17 * 10^{-5}$	hochsignifikant
2. B1.1 - B2.1	$2,58 * 10^{-8}$	hochsignifikant
3. A1.2 - A2.2	0,062	gering signifikant
4. B1.2 - B2.2	0,002	signifikant
5. A1.1 - B1.1	$7,51 * 10^{-7}$	hochsignifikant
6. A2.1 - B2.1	$5,26 * 10^{-9}$	hochsignifikant
7. A1.2 - B1.2	0,024	signifikant
8. A2.2 - B2.2	$7,58 * 10^{-4}$	hochsignifikant

Die Auswertung der p-Werte ergibt in fünf Fällen eine deutliche Signifikanz der Ergebnisse zugunsten der Annahme von Hypothese 3. Es zeigt sich, dass bei Einsatz des Plant@Hand Montageassistenzsystems der Wirkungsgrad deutlich signifikant höher liegt, wenn die erstmalige Ausführung der Aufgabe in den unterschiedlichen Testgruppen und Durchläufen verglichen wird. Daraus lässt sich der starke Effekt der kognitiven Unterstützung für das kognitive Erarbeiten der Aufgabenstellung und

das richtige Anwenden der Information im physischen Arbeitsprozess schlussfolgern.

Damit lässt sich die untersuchte Hypothese 3 ebenso im Rahmen der Evaluation ohne Einschränkung bestätigen.

5.5.4. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zielte mit dem Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystems auf die Unterstützung von kognitiven Arbeitsprozessen, die sich mit herkömmlichen Mitteln nicht direkt beobachten lassen. Jedoch lassen sich durch eine quantitative sowie qualitative Betrachtung der physischen Arbeitsprozesse Rückschlüsse auf den kognitiven Anteil der Arbeit und damit auch auf die Qualität des Informationsprozesses ziehen [AU14]. Dieses Vorgehen wurde für eine Bewertung der Effekte kognitiver Informationsassistenz auf manuelle Arbeitsprozesse, wie zum Beispiel die Montage, gewählt. Im Fokus der Evaluation standen dabei insbesondere die Betrachtung der kognitiven Bearbeitungsdauer, der Fehlerrate sowie der Wirkungsgrad als Entscheidungskriterien. Dazu wurden diese Kennwerte in einer Untersuchung mit wechselnden Reihenfolgen in zwei Testgruppen erhoben und anschließend empirisch untersucht und statistisch ausgewertet. Anhand der Evaluation wurden die zuvor aufgestellten Untersuchungshypothesen bestätigt und es können bezogen auf die vorliegende Arbeit folgende Kernaussagen getroffen werden:

1. Kognitive Informationsassistenz unterstützt den Werker durch die Vorauswahl und Filterung von Informationen bzw. durch das autonome Erarbeiten einer Handlungsstrategie bei der kognitiven Verarbeitung der Aufgabenstellung.
2. Kognitive Informationsassistenz reduziert die absolute und relative Zeitdauer für die kognitiver Informationsverarbeitung.
3. Kognitive Informationsassistenz erhöht die Qualität der Arbeitsausführung durch Reduzierung der Fehlerrate.
4. Kognitive Informationsassistenz bewirkt durch die Reduzierung der Fehlerrate und der Zeit zur kognitiven Informationsverarbeitung eine Erhöhung des Wirkungsgrades in der Montage.

Da in dem zur Evaluation verwendeten Prototypen des Plant@Hand Montageassistenzsystems nicht alle in dieser Arbeit konzeptionell erarbeiteten Aspekte des Cognitive Apprenticeship bzw. der Team Cognition umgesetzt wurden, lässt sich aus der Evaluation kein verlässlicher Schluss über das Langzeit-Lernverhalten mit Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystem ziehen. Die Beobachtungen und Ergebnisse lassen jedoch vermuten, dass ohne eine erfahrungsbedingte Skalierung der Hilfestellung mittels Scaffolding und Fading, die eigene kognitive Leistung des Werkers und damit die aktive Auseinandersetzung mit dem Arbeitsgegenstand nachlässt.

5.6. Zusammenfassung und Bewertung

In diesem Kapitel wurde die hardwaretechnische, softwaretechnische und methodische Umsetzung des konzeptionellen Lösungsansatzes der kognitiven Informationsassistentz aus Kapitel 4 für den Anwendungsbereich der manuellen Montage beschrieben und anschließend evaluiert. Die wesentlichen Erkenntnisse daraus lassen sich wie folgt als Thesen für die vorliegende Arbeit formulieren:

1. Die enge Betrachtung psychologischer wie auch technologischer Aspekte der kognitiven Informationsassistentz ergibt einen konzeptionell validen Lösungsansatz, der sich auch in der Praxis in Form des Plant@Hand Montageassistentzsystems realisieren ließ.
2. Kognitive Informationsassistentz führt durch die Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse des Werkers bezogen auf die Zeitdauer, die Qualität der Arbeitsausführung sowie den Wirkungsgrad zu einer quantitativen und qualitativen Verbesserung der physischen Arbeitsprozesse.

Durch die Umsetzung und Evaluation wurde schließlich die letzte wissenschaftliche Leitfrage aus 1.3 beantwortet. Die wesentlichen Ergebnisse dieses Kapitels im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind:

1. Das **Plant@Hand Montageassistentzsystem** (siehe Abschnitte 5.2-5.4) realisiert den konzeptionellen Lösungsansatz kognitiver Informationsassistentz hardwaretechnisch, softwaretechnisch sowie methodisch. Es zeigt an einer prototypischen Beispiellösung die technologische Machbarkeit der in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagenen Konzepte, Methoden und Modelle.
2. Die **Evaluation** des Plant@Hand Montageassistentzsystem (siehe Abschnitt 5.5) bestätigt die erwarteten positiven Effekte der kognitiven Informationsassistentz auf den Arbeitsprozess.

Damit kann die konzeptionelle und technologische Entwicklung eines Ansatzes zur Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse des Werkers sowie der dazu erforderlichen Informationsflüsse in der manuellen Montage als erfolgreich bewertet und abgeschlossen werden.

6. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit stellt einen neuen Lösungsansatz zur Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse und zur Automatisierung der Informationsflüsse in der Montage vor. Durch die disziplinübergreifende Betrachtung sowie Entwicklung des Lösungsansatzes wurde eine Verbindung zwischen den psychologischen Aspekten und technologischen Komponenten hergestellt, welche in einer Systemarchitektur und einer Beispielimplementierung konkretisiert und realisiert wurde.

In den folgenden Abschnitten werden der wissenschaftliche Beitrag der vorliegenden Arbeit (Abschnitt 6.1) und die während der Bearbeitung gewonnenen Erkenntnisse (Abschnitt 6.2) zusammengefasst und bewertet. Anschließend wird in Abschnitt 6.3 ein Ausblick auf die offenen und neuen Fragestellungen in Erweiterung der vorliegenden Arbeit eingegangen.

6.1. Ergebnisse

Die wissenschaftliche Bearbeitung des Themas wurde durch vier Leitfragen (siehe Abschnitt 1.3) geführt. Diese wurden durch einen systematischen Bearbeitungsprozess bestehend aus Analyse, Konzeption, Umsetzung und Bewertung adressiert sowie beantwortet. Während die einzelnen Ergebnisse aus diesem Prozess bereits in der Zusammenfassung jedes Kapitels aufgeführt wurden, soll nun eine Bewertung hinsichtlich der Leitfragen vorgenommen werden.

1. *Welche psychologischen Aspekte müssen bei der kognitiven Unterstützung der Arbeitsprozesse in der Montage berücksichtigt werden?*

Im Abschnitt 2.2 wurden die wesentlichen psychologischen Aspekte, die für das menschliche Denken und Handeln relevant sind, eingeführt und systematisiert. In den darauf folgenden Abschnitten 3.5 und 3.6 wurden anschließend Analysemethoden des Cognitive Engineering eingesetzt, um die relevanten kognitiven Arbeitsprozesse in der Montage zu identifizieren und in ihrer Abhängigkeit zum Montagekontext zu beschreiben. Das **Entscheidungsleitermodell** aus dem Abschnitt 3.6 beschreibt dabei den relevanten kognitiven Zyklus zur Analyse, Entscheidung und Planung am Montagearbeitsplatz. Es bildet den Fokus in der weiteren wissenschaftlichen Betrachtung. Weitere psychologische Aspekte, wie zum Beispiel Aufmerksamkeit oder Eigen- bzw. Fremdmotivation, wurden in diesem Zusammenhang in den Grundlagen betrachtet aber nicht weiter fokussiert. Eine lernpsychologische Sicht auf die kognitive Informationsassistentz

6. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

wurde schließlich in Abschnitt 4.2 eingenommen, um damit das **methodische Grundmodell** für die Vermittlung von Handlungswissen durch ein technologisches Assistenzsystem zu erarbeiten. Damit wurden insbesondere kognitions- und lernpsychologische Aspekte im Rahmen der vorliegenden Arbeit identifiziert und betrachtet.

Das wissenschaftliche Ergebnis dieser Arbeit zur Beantwortung der Fragestellung ist die vorgeschlagene **Methodik der kognitiven Informationsassistentz**. Diese verknüpft das Prinzip der Team Cognition mit dem Cognitive Apprenticeship Model auf der Handlungsebene mit den Hauptaufgaben kognitiver Informationsassistentz (Bewusstmachen, Vorbeugen, Führen, Anleiten, Dokumentieren und Überprüfen). Dadurch wird die bewusste Handlungssteuerung des Werkers in den Teilprozessen Denken, Lernen, Speichern und Erinnern situativ angemessen unterstützt.

2. Welche technologischen Komponenten und Verfahren sind zur kognitiven Informationsassistentz erforderlich?

Durch die systematische Entwicklung eines **Prozessmodells** in Abschnitt 4.1 und die Betrachtung einer **Methodik** für kognitive Informationsassistentz in Abschnitt 4.2 wurde die Basis zur Ableitung von technologischen Systeme, Komponenten und Verfahren gelegt. Diese wurden in den darauf folgenden Abschnitten 4.3 und 4.4 in eine **Schichtenarchitektur** und die Detaillierung der Komponenten und Verfahren am **Beispiel einer kognitiven Architektur** überführt. Wesentlicher Kern dieser Erarbeitung ist das Zusammenspiel und die Auslegung der logischen Systeme und Komponenten **digitales Abbild**, **digitales mentales Modell** sowie **digitale Handlungssteuerung**. Diese orientieren sich in ihrem generellen Aufbau und teilweise in der Funktion an ähnlichen Mechanismen der menschlichen Kognition und greifen damit das Entscheidungsleitermodell wieder auf. Damit wurden die technologischen Komponenten und Verfahren zur kognitiven Informationsassistentz identifiziert und detailliert.

Das wissenschaftliche Ergebnis der vorliegenden Arbeit zur Beantwortung der Fragestellung ist die vorgeschlagene **Technologie der kognitiven Informationsassistentz**. Sie definiert als technologischen Rahmenwerk innerhalb des Architekturmodells die erforderlichen logischen Systeme und Komponenten. Außerdem beschreibt sie die erforderlichen Verfahren zur Umsetzung kognitiver Informationsassistentz am manuellen Montagearbeitsplatz.

3. Wie müssen die technologischen Komponenten miteinander integriert werden, um die Automatisierung des Informationsflusses zu ermöglichen?

Eine Automatisierung des Informationsflusses ist nur durch die Einbettung der kognitiven Informationsassistentz in die bestehende technologische Infrastruktur am Montagearbeitsplatz möglich. Darum wurde in Abschnitt 3.4 ein allgemeines **Modell zur informationstechnischen Einbettung** und in Abschnitt 4.3 durch die vorgeschlagene **Schichtenarchitektur** sowie die Konkretisie-

rung der Komponenten und Verfahren ein Lösungsansatz für die Verbindung der produktionsführenden Systeme mit Komponenten und Funktionen der kognitiven Informationsassistentz am Montagearbeitsplatz erarbeitet. Dieser wurde mit Hilfe der kognitiven Architektur Soar exemplarisch realisiert und als **Plant@Hand Montageassistenzsystem** mit beispielhaften Montagedaten evaluiert (siehe Abschnitt 5). Damit wurde eine konzeptionelle als auch praktische Integration der technologischen Komponenten zur Automatisierung des Informationsflusses vorgenommen.

Das wissenschaftliche Ergebnis der vorliegenden Arbeit zur Beantwortung der Fragestellung ist das vorgeschlagene **Prozessmodell und das Architekturmodell der kognitiven Informationsassistentz** sowie deren beispielhafte Umsetzung mit der kognitiven Architektur Soar im Plant@Hand Montageassistenzsystem.

4. *Welchen Einfluss hat die kognitive Informationsassistentz auf den Wirkungsgrad und die Qualität des Arbeitsprozesses?*

Durch die **Evaluierung** der in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagenen Grundkonzepte mit Hilfe des Plant@Hand Montageassistenzsystems konnten Aussagen über die Auswirkungen eines kognitiven Informationsassistenzsystems auf den Arbeitsprozess gewonnen werden. So konnte in Abschnitt 5.5 festgestellt werden, dass für die gegebene Beispielmontageaufgabe durch den Einsatz eines kognitiven Informationsassistenzsystems der Wirkungsgrad signifikant erhöht und die Fehlerrate signifikant reduziert wurde. Gleichzeitig wurde eine Reduzierung der Zeit zur Informationsbeschaffung konstatiert. Damit lassen sich hier die wissenschaftliche Validität der entwickelten Modelle und Konzepte als auch konkrete wirtschaftlich-ökonomische Effekte bestätigen.

Das wissenschaftliche Ergebnis der vorliegenden Arbeit zur Beantwortung der Fragestellung ist der **Nachweis** der Reduzierung der Zeitdauer und der Steigerung der Qualität der Arbeitsausführung sowie des Wirkungsgrades durch den Einfluss kognitiver Informationsassistentz.

Der wissenschaftliche Beitrag der vorliegenden Arbeit bemisst sich damit an der konzeptionellen Verknüpfung sowie Diskussion von psychologischen und technologischen Aspekten der kognitiven Informationsassistentz und der daraus folgenden systematischen Entwicklung und Umsetzung eines Lösungsansatzes zur Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse und zur Automatisierung der dazu erforderlichen Informationsflüsse am manuellen Montagearbeitsplatz.

6.2. Erkenntnisse

Die vorliegende Arbeit wurde durch die enge Verknüpfung der beiden Disziplinen Informatik und Psychologie motiviert und angetrieben. Aus diesem Grundverständnis heraus wurde der Mensch nicht als Blackbox betrachtet, sondern Wert auf das Verstehen und Anwenden psychologischer Erkenntnisse zur Problemanalyse und

6. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Lösungsentwicklung gelegt. Im Verlauf der wissenschaftlichen Bearbeitung konnten daraus folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

1. **Cognitive Engineering** als methodische Brücke zwischen der Informatik und der Psychologie eignet sich für die Entwicklung sozio-technischer Lösungsansätze, die sich auf die Interaktion zwischen Mensch und Maschine konzentrieren. Das methodische Grundgerüst bietet hilfreiche Werkzeuge und Verfahren, um nicht beobachtbare (kognitive) Vorgänge im Menschen verständlich und begreifbar zu analysieren sowie daraus Rückschlüsse auf technologische Anforderungen zu gewinnen. Durch den Einsatz von Methoden des Cognitive Engineering wurde die nicht-beobachtbaren kognitiven Arbeitsprozesse des Werkers in der Montage erkennbar und erklärbar. Es konnte damit unmittelbare Beziehung zwischen den kognitiven Arbeitsprozessen und den technologischen Merkmalen eines Informationsassistenzsystems hergestellt und darauf aufbauend ein integrierendes Lösungskonzept entworfen, welches in dieser Tiefe ohne diese Methoden nicht möglich gewesen wäre.
2. Kognitive Informationsassistenz berührt menschliche Prozesse des Verstehens und Handelns, die nicht nur einen technologischen Lösungsansatz erfordern, sondern ebenfalls eine **methodische Lösung**. Insbesondere bei der gezielten Vermittlung von Wissen müssen darum pädagogische Modelle und Konzepte in die Betrachtungen einfließen, um eine funktionierende Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine zu ermöglichen. Weitere Aspekte sind soziale Akzeptanz, individuelle Motivation oder kognitive Fähigkeiten. Diese erweitern das konzeptionelle Rahmenwerk und müssen daher im Einzelnen stark fokussiert betrachtet werden. Daher wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Fokus auf den menschlichen Prozess der bewussten Handlungssteuerung und die methodische Unterstützung des kooperativen Arbeitens gelegt. Dadurch konnte die kognitive Informationsassistenz nicht nur technologisch in den Arbeitsalltag integriert, sondern auch ein wissenschaftlich fundierter Ansatz zur Sicherstellung des Informationstransfers zwischen Assistenzsystem und Werker umgesetzt werden. Ohne dieses methodische Gerüst hätte eine Wissensaufnahme durch den Werker nicht angenommen werden können.
3. Die **wissenschaftlichen Arbeitsweisen** in den beiden Disziplinen Informatik und Psychologie unterscheiden sich an markanten Stellen. Während die Informatik ihre Stärke aus der Abstraktion, Formalisierung und Systematisierung bezieht, agiert die Psychologie durch Beobachtung, Beschreibung und Einordnung. Dies wirkt sich insbesondere bei der Anwendung der unterschiedlichen Methoden aus. Aus diesem Grund verknüpft die vorliegende Arbeit stark beschreibende Erklärungsmodelle der Psychologie mit abstrakteren Formalismen und Architekturen der Informatik.

Im Ergebnis kann diese enge Verknüpfung beider Disziplinen als Gewinn und nicht als Hürde verstanden werden.

6.3. Ausblick

Im Abschluss der vorliegenden Arbeit soll nun auf weitere wissenschaftliche Fragestellungen verwiesen werden, die während der Bearbeitung neu identifiziert wurden oder durch den Fokus der Arbeit nicht abgedeckt wurden. Hierzu werden folgende Fragestellungen formuliert:

- *Welchen Einfluss haben Akzeptanz und Motivation auf den Erfolg eines kognitiven Informationsassistentensystems?*
- *Mit welchen technologischen Ansätzen lässt sich eine Selbsterklärbarkeit der kognitiven Informationsassistenten insbesondere in komplexen Situationen umsetzen?*
- *Wie lässt sich Handlungswissen automatisiert aus vorhandenen Daten- und Dokumentquellen oder/und dem Verhalten des Werkers ableiten?*
- *Wie lässt sich Handlungswissen bereits durch eine semantische Anreicherung von Konstruktionsmodellen modellieren?*
- *Mit welchen Werkzeugen wird Handlungswissen im Arbeitsprozess modelliert?*
- *Wie lässt sich eine kognitive Be- oder Überlastungssituation des Werkers objektiviert erkennen?*

Durch die disziplin-übergreifende Konzeption und Entwicklung eines kognitiven Informationsassistentensystems für den manuellen Montagearbeitsplatz wurde die Grundlage für die Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse und die Automatisierung der Informationsflüsse geschaffen. Zukünftige Arbeiten können darauf aufbauen und die bestehenden Modelle erweitern und verbessern.

A. Dokumente der Analyse

A.1. Fragen an die Mitarbeiter in der Montage

Zur Ersterfassung der Informationsprozesse am Montagearbeitsplatz wurde ein Einführungs-interview mit den Werkern durchgeführt. Dieses hatte zum Ziel einen allgemeinen Überblick über die informationstechnischen Rahmenbedingungen am Montagearbeitsplatz zu erhalten.



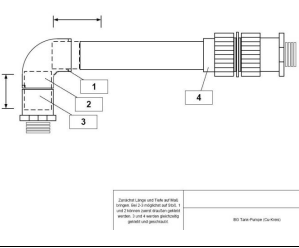
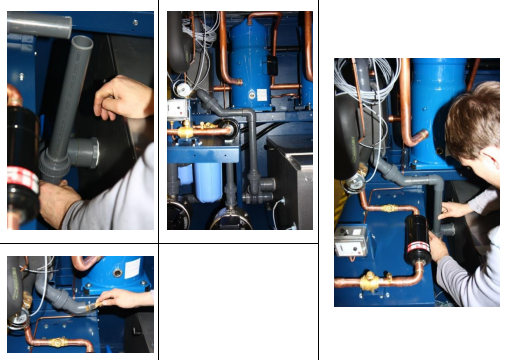
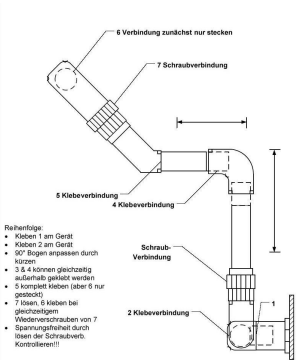
1. Allgemeine Angaben
 - Laufende Nummer:
 - Uhrzeit und Datum:
 - Arbeitsplatz:
2. Beschreiben Sie kurz Ihre Tätigkeit im Unternehmen!
3. Wie ist ihr beruflicher Werdegang (Ausbildung, berufliche Stationen)?
4. Haben Sie den Beruf gelernt?
5. Welche speziellen Fähigkeiten und welches Wissen benötigen Sie für Ihre Arbeit?
6. Welche Informationen (Daten) benötigen Sie für Ihre Arbeit?
7. Woher erhalten Sie die Informationen?
8. Welche Informationen (Daten) geben Sie weiter? Wohin?
9. Wie sind Ihre Computerkenntnisse?
 - Welche Programme nutzen Sie während der Arbeit?
 - Welche Zuhause?
 - Nutzen Sie das Internet?
 - Handy, PDA?
10. Können Sie sich vorstellen, bei ihrer Arbeit durch einen Computer unterstützt zu werden?
11. Wer ist Ihr Ansprechpartner bei Problemen mit Ihrer Arbeit?
12. Wo finden Sie Dokumente, die Ihnen bei Problemen weiterhelfen können?

A. Dokumente der Analyse

13. Wenn Sie etwas verbessern könnten, was würde das sein?

Die Interviews wurden im Rahmen der Analyse durch Audioaufzeichnungen protokolliert und anschließend ausgewertet.

A.2. Beispiel einer Montageanleitung mit Prozessbebilderung und 2D-Zeichnungen

				
35.4 BG zum prüfen der Höhe kurz zusammenschrauben: eventuell muss Höhe zur Pumpe an der Muffe im Tank gerichtet werden)				
zurechtbiegen Werkzeug: mit Hand				
35.5 BG auf Maß bringen: Länge Tank-Pumpe; Tiefe zur Pumpe siehe Bild				
Hilfsstoffe: Tangitreiniger PVC-U/C ABS		Artikelnr.: B73000000002		
Werkzeug: Pinsel				
35.6 Kleben der Verbindungen nach Anweisungen, Reihenfolge siehe Bild				
Hilfsstoffe: Tangitkleber PVC-U 799 270 357		Artikelnr.: B21000000001		
Werkzeug: Lappen				
Zeichnung_BG_Tank_Pumpe_Cu.pdf				
 				
36 Kleben BG WT-Austritt-Tank (Cu-Kreis)				
36.1 40'er Überwurfmutter entgraten und leichtläufig machen				
36.2 Kleben der Verbindungen, Reihenfolge siehe Bild				
Hilfsstoffe: Tangitreiniger PVC-U/C ABS		Artikelnr.: B73000000002		
Werkzeug: Pinsel				
Werkzeug: Lappen				
Zeichnung_BG_WT_Austritt_Tank_Cu.pdf				
 				
37 Pumpen- & Tankentleerung				
Gerader Verbinder 10mm 10 / PM0410E		2	ST	T66400000008
montage (1048).JPG				
Gerader Verbinder 12mm 12mm - PM0412E		2	ST	T16000000004
Winkel-Einschraubverbinder 10-3/8" 10-3/8" PM091013E		2	ST	T76080000003
Sicherungsscheibe VA 1mm da=21,5mm d=16,5		2	ST	Z05000000001
Verschlussstopfen PM0812R rt Rohr AD12		2	ST	T66223000006

B. Dokumente der Evaluation

B.1. Fragebogen zur Selbsteinschätzung

Befragung

1 - stimmt nicht | 2 - stimmt eher nicht | 3 - weiß ich nicht | 4 - stimmt eher | 5 - stimmt

Wie beurteilst du die ausgeführte Aufgabe?

	1	2	3	4	5
Die Aufgabe war komplex.					
Die Aufgabe war schwierig.					

Wie beurteilst du die Montageanleitung?

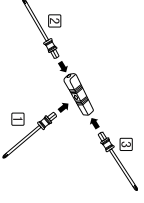
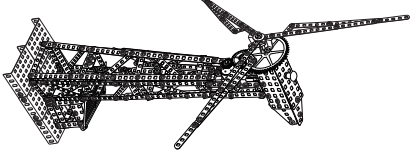
	1	2	3	4	5
Ich wusste was ich tun musste.					
Ich hatte alle notwendigen Informationen.					
Ich habe bei Fehlern einen Hinweis erhalten.					
Ich wusste im 2. Durchlauf besser, wie ich die Aufgabe angehen muss.					
Die bereitgestellten Informationen haben mir geholfen.					
Ich wusste welches Material (Schrauben, Muttern usw.) gemeint war.					
Ich wusste welches Werkzeug (Schraubendreher usw.) gemeint war.					

Welche Informationen hättest du dir noch gewünscht?

[illegible]

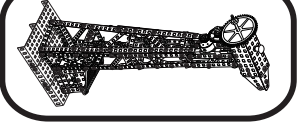
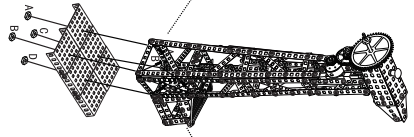
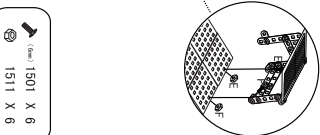
B.2. Beispielseiten aus der klassischen Montageanleitung

626 Teile

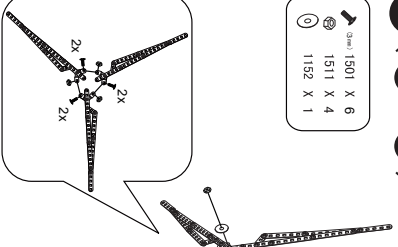
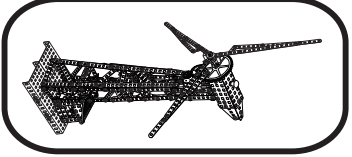
(6mm)	1501	X	194	(1/4(1mm))	1402	X	3
(8mm)	1502	X	6	(1/2(1mm))	1401	X	2
(12mm)	1505	X	2	XPJ	X	4	
(15mm)	1506	X	2	1307	X	1	
(22mm)	1507	X	1	1151	X	4	
(30mm)	1371	X	1	1152	X	1	
	1511	X	211	2317	X	1	
	D001	X	10	A2316	X	1	
	D002	X	7	2315	X	1	
	D003	X	8	2512	X	1	
	D004	X	14	D102	X	2	
	D005	X	4	D112	X	1	
	D006	X	26	D103	X	5	
	D007	X	47	D111	X	6	
	D221	X	1				
	D202	X	2				
	D200	X	3				

15 (7 + 14)

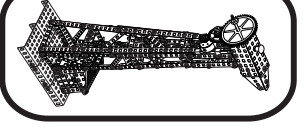
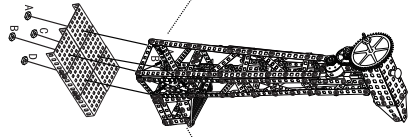
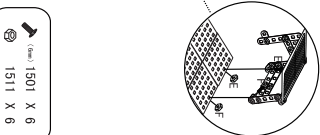
(6mm)	1501	X	6
(8mm)	1511	X	4
(12mm)	1152	X	1

16 (8 + 15)

(6mm)	1501	X	6
(8mm)	1511	X	4
(12mm)	1152	X	1

16 (8 + 15)

(6mm)	1501	X	6
(8mm)	1511	X	4
(12mm)	1152	X	1

Abkürzungsverzeichnis

4CAPS	Cortical Capacity-Constrained Concurrent Activation-based Production System
ACT-R	Adaptive Control of Thought - Rationale
BDE	Betriebsdatenerfassung
bzw.	beziehungsweise
CAM	Cognitive Apprenticeship Model
CAD	Computer Aided Design
CPU	Central Processing Unit
CTA	Cognitive Taks Analysis
CWA	Cognitive Work Analysis
DA	Digitales Abbild
DCS	Discrete Control System
DMM	Digitales mentales Modell
ECM	Enterprise Content Management
ECMS	Enterprise Content Management System
ERP	Enterprise Resource Planning
ESB	Enterprise Service Bus
FSR	Force Sensitive Resistors
HTML	Hypertext Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
ID	Integriertes Datenmodell
ISO	International Organization for Standardization
MES	Manufacturing Execution System
PCS	Process Control System
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
PM	Primärmontage
PPS	Produktionsplanungssystem
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio-Frequency Identification
RL	Reinforcement Learning
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SM	Sekundärmontage
Soar	State, Operator and Result
UML	Unified Modeling Language
USB	Universal Serial Bus

Literatur

- [AB14] Mario Aehnelt und Sebastian Bader. “Mobile Informationsassistentz für die Montage”. In: *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen*. Hrsg. von R. Weidner und T. Redlich. Hamburg: Verlag der Universität der Bundeswehr Hamburg, 2014, S. 370–380. ISBN: 9783868180732. URL: http://www.humanhybridrobot.info/wp-content/uploads/2015/01/Band_zur_ersten_Konferenz_Technische_Unterstuetzungssysteme_die_die_Menschen_wirklich_wollen_2014.pdf.
- [AB15a] Mario Aehnelt und Sebastian Bader. “From Information Assistance to Cognitive Automation: A Smart Assembly Use Case”. In: *Agents and artificial intelligence*. Hrsg. von Béatrice Duval u. a. Bd. 9494. Lecture Notes in Computer Science. Cham und Heidelberg: Springer, 2015, S. 207–222. ISBN: 978-3-319-27946-6. DOI: 10.1007/978-3-319-27947-3_11.
- [AB15b] Mario Aehnelt und Sebastian Bader. “Information Assistance for Smart Assembly Stations”. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2015)*. Hrsg. von Stephane Loiseau u. a. Bd. 2. Lisbon, Portugal: SciTePress, 2015, S. 143–150. ISBN: 9789897580741. DOI: 10.5220/0005216501430150.
- [AB16] Mario Aehnelt und Sebastian Bader. “Providing and Adapting Information Assistance for Smart Assembly Stations”. In: *Proceedings of the 2016 SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*. London, UK: IEEE, 2016, S. 314–323. ISBN: 978-1-5090-1121-6.
- [Ack89] R. L. Ackoff. “From Data to Wisdom”. In: *Journal of Applied Systems Analysis* 16 (1989), S. 3–9.
- [Aeh+13] Mario Aehnelt u. a. “Situation Aware Interaction with Multi-modal Business Applications in Smart Environments”. In: *Human Interface and the Management of Information. Information and Interaction for Learning, Culture, Collaboration and Business*. Hrsg. von David Hutchison u. a. Bd. 8018. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 413–422. ISBN: 978-3-642-39225-2. DOI: 10.1007/978-3-642-39226-9_45.
- [AGU14] Mario Aehnelt, Enrico Gutzeit und Bodo Urban. “Using Activity Recognition for the Tracking of Assembly Processes: Challenges and Requirements”. In: *WOAR 2014*. Hrsg. von Gerald Bieber, Mario Aehnelt und

- Bodo Urban. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag und Fraunhofer Verlag, 2014, S. 12–21. ISBN: 978-3-8396-0792-3.
- [AK01] Lorin W. Anderson und David R. Krathwohl. *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. Complete ed. New York: Longman, 2001. ISBN: 0321084055.
- [AL11] Ulrich Ansorge und Helmut Leder. *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit*. Basiswissen Psychologie. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011. ISBN: 3531167049.
- [Ald72] Clayton P. Alderfer. *Existence, relatedness, and growth: Human needs in organizational settings*. New York: Free Press, 1972.
- [All87] D. A. Allport. "Selection for action". In: *Perspectives on Perception and Action*. Hrsg. von H. Heuer und H. F. Sanders. Lawrence Erlbaum Associates Inc, 1987.
- [And83] John R. Anderson. *The architecture of cognition*. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1983.
- [And96] John R. Anderson. "ACT: A Simple Theory of Complex Cognition". In: *American Psychologist* 51.4 (1996), S. 355–365.
- [AU14] Mario Aehnelt und Bodo Urban. "Follow-Me: Smartwatch Assistance on the Shop Floor". In: *HCI in Business*. Hrsg. von Fiona Fui-Hoon Nah. Bd. 8527. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, 2014, S. 279–287. ISBN: 978-3-319-07292-0. DOI: 10.1007/978-3-319-07293-7_27. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-07293-7_27.
- [AU15] Mario Aehnelt und Bodo Urban. "The Knowledge Gap: Providing Situation-Aware Information Assistance on the Shop Floor". In: *HCI in Business: Second International Conference, HCIB 2015, Held as Part of HCI International 2015, Los Angeles, CA, USA, August 2-7, 2015, Proceedings*. Hrsg. von Fiona Fui-Hoon Nah und Chuan-Hoo Tan. Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 232–243. ISBN: 978-3-319-20895-4. DOI: 10.1007/978-3-319-20895-4_22. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-20895-4_22.
- [AW15] Mario Aehnelt und Karoline Wegner. "Learn but Work! Towards Self-directed Learning at Mobile Assembly Workplaces". In: *Proceedings of the 15th International Conference on Knowledge Technologies and Data-driven Business*. Hrsg. von Stefanie Lindstaedt, Tobias Ley und Harald Sack. ACM Press, 2015, S. 1–7. ISBN: 978-1-4503-3721-2. DOI: 10.1145/2809563.2809577.

- [BA14] Sebastian Bader und Mario Aehnelt. “Tracking Assembly Processes and Providing Assistance in Smart Factories”. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ESEO, Angers, Loire Valley, France, 6 - 8 March, 2014*. Hrsg. von B. Duval u. a. Bd. 1. S.l.: SciTePress, 2014, S. 161–168. ISBN: 978-989-758-015-4. DOI: 10.5220/0004822701610168.
- [Bal09] Helmut Balzert. *Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements-Engineering*. 3. Aufl. Lehrbücher der Informatik. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl., 2009. ISBN: 978-3827417053.
- [Bal11] Helmut Balzert. *Lehrbuch der Softwaretechnik: Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011. ISBN: 978-3827417060. URL: <http://gbv.ebibli.com/patron/FullRecord.aspx?p=3067150>.
- [Bat05] M. J. Bates. “Information and knowledge: an evolutionary framework for information science: paper 239”. In: *Information Research* 10.4 (2005).
- [BF13] Patricia Bockelman Morrow und Stephen M. Fiore. “Team cognition: coordination across individuals and machines”. In: *The Oxford handbook of cognitive engineering*. Hrsg. von John D. Lee und Alex Kirlik. Oxford library of psychology. Oxford University Press, 2013, S. 200–215. ISBN: 9780199757183.
- [Bie+11] Gerald Bieber u. a. “Hands-free Interaction mittels Handgelenksensoren für mobile Assistenzsysteme”. In: *6. Multimediakongress Wismar 2011: Netzwerk - Forschung - Innovation*. 2011, S. 7.
- [Bil91] Charles E. Billings. “Human-centered aircraft automation: A concept and guidelines: NASA Technical Memorandum 103885: National Aeronautics and Space Administration (NASA)”. In: (1991).
- [BK11] Susanne Bødker und Clemens Nylandsted Klokmoose. “The Human–Artifact Model: An Activity Theoretical Approach to Artifact Ecologies”. In: *Human–Computer Interaction* 26.4 (2011), S. 315–371. ISSN: 0737-0024. DOI: 10.1080/07370024.2011.626709.
- [BKG01] J. Brill, B. Kim und C. Galloway. “Cognitive apprenticeships as an instructional model”. In: *Emerging perspectives on learning, teaching, and technology*. Retrieved from: <http://www.coe.uga.edu/epltt/CognitiveApprenticeship.htm> (2001).
- [BKU12] Gerald Bieber, Thomas Kirste und Bodo Urban. “Ambient interaction by smart watches”. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. Hrsg. von F. Makedon. [S.l.]: ACM, 2012, S. 1–6. ISBN: 978-1-4503-1300-1. DOI: 10.1145/2413097.2413147.

- [Blo+56] B. S. Bloom u. a. *Taxonomy of educational objectives: The classification of education goals. Handbook I: Cognitive Domain*. New York: Longmans, 1956.
- [Boy98] Guy A. Boy. “Cognitive function analysis for human-centered automation of safety-critical systems”. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI98)*. Hrsg. von Michael E. Atwood u. a. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1998, S. 265–272. DOI: 10.1145/274644.274682.
- [BP99] Peter Baumgartner und Sabine Payr. *Lernen mit Software*. 2. Aufl. Bd. 1. Lernen mit interaktiven Medien. Innsbruck, Wien und München: Studien-Verlag, 1999. ISBN: 9783706514446.
- [Bru66] Jerome Seymour Bruner. *Toward a theory of instruction*. Harvard University Press, 1966. ISBN: 0674897013.
- [CBN89] Allan Collins, John Seely Brown und Susan E. Newman. “Cognitive apprenticeship: Teaching the crafts of reading, writing, and mathematics”. In: *Knowing, learning, and instruction: Essays in honor of Robert Glaser* 18 (1989), S. 32–42.
- [CH13] B. W. Crandall und R. R. Hoffman. “Cognitive Task Analysis”. In: *The Oxford handbook of cognitive engineering*. Hrsg. von John D. Lee und Alex Kirlik. Oxford library of psychology. Oxford University Press, 2013, S. 229–239. ISBN: 9780199757183.
- [Coo+00] Nancy J. Cooke u. a. “Measuring team knowledge”. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 42.1 (2000), S. 151–173. ISSN: 0018-7208.
- [DA99] Anind K. Dey und Gregory D. Abowd. “Towards a better understanding of context and context-awareness”. In: *In HUC '99: Proceedings of the 1st international symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*. Springer-Verlag, 1999, S. 304–307.
- [DB12] Joachen Deuse und Felix Busch. “Zeitwirtschaft in der Montage”. In: *Montage in der industriellen Produktion*. Hrsg. von Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl. SpringerLink : Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 79–108. ISBN: 3642290612.
- [DD11] Ira Diethelm und Christina Dörge, Hrsg. *Zur Diskussion von Kontexten und Phänomenen in der Informatikdidaktik*. 2011.
- [DMM10] Leslie A. DeChurch und Jessica R. Mesmer-Magnus. “The cognitive underpinnings of effective teamwork: a meta-analysis”. In: *Journal of Applied Psychology* 95.1 (2010), S. 32. ISSN: 1939-1854.
- [Doh01] Günther Dohmen. *Das informelle Lernen: Die internationale Erschließung einer bisher vernachlässigten Grundform menschlichen Lernens für das lebenslange Lernen aller*. Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF, 2001.

- [Dre08] Gerhard Drees. “Lernen und Lernprobleme in der beruflichen Bildung”. In: *Betriebliches Lernen und Organisationsentwicklung, Teil 3* (2008).
- [ElM12] Hoda A. ElMaraghy, Hrsg. *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN: 978-3-642-23859-8.
- [Era11] Michael Eraut. “Informal learning in the workplace: evidence on the real value of work-based learning (WBL)”. In: *Development and Learning in Organizations* 25.5 (2011), S. 8–12. DOI: 10.1108/14777281111159375.
- [EU04] W. H. ElMaraghy und R. J. Urbanic. “Assessment of Manufacturing Operational Complexity”. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53.1 (2004), S. 401–406. ISSN: 00078506. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60726-4.
- [Fas+09] Åsa Fasth u. a. “Designing proactive assembly systems—Criteria and interaction between Automation, Information, and Competence”. In: *Proceedings of the 42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*. University of Grenoble, France, 2009.
- [FB+13] Åsa Fast-Berglund u. a. “Relations between complexity, quality and cognitive automation in mixed-model assembly”. In: *Journal of manufacturing systems* 32.3 (2013), S. 449–455. ISSN: 0278-6125.
- [Fes62] Leon Festinger. *A theory of cognitive dissonance*. Stanford university press, 1962. ISBN: 0804709114.
- [Fri09] Martin Frické. “The knowledge pyramid: a critique of the DIKW hierarchy”. In: *Journal of information science* 35.2 (2009), S. 131–142. ISSN: 0165-5515.
- [GDT13] Paolo Gunetti, Tony Dodd und Haydn Thompson. “Simulation of a Soar-Based Autonomous Mission Management System for Unmanned Aircraft”. In: *Journal of Aerospace Information Systems* 10.2 (2013), S. 53–70. ISSN: 2327-3097.
- [GG02] Carl Gutwin und Saul Greenberg. “A Descriptive Framework of Workspace Awareness for Real-Time Groupware”. In: *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)* 11.3 (2002), S. 411–446.
- [GI07] Sabri Gurbuz und N. Inoue. “Real-Time Head Pose Estimation using Reconstructed 3D Face Data from Stereo Image Pair”. In: *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007. IEEE International Conference on*. Bd. 2. 2007, S. II-785–II-788. DOI: 10.1109/ICASSP.2007.366353.
- [Gra04] Klaus Grawe. *Neuropsychotherapie*. Göttingen: Hogrefe, 2004. ISBN: 3-8017-1804-2.

- [GSP11] T. Gonzalez-Sanchez und D. Puig. “Real-time body gesture recognition using depth camera”. In: *Electronics Letters* 47.12 (2011), S. 697–698. ISSN: 0013-5194. DOI: 10.1049/el.2011.0967.
- [Gut+11] E. Gutzeit u. a. “Skin cluster tracking and verification for hand gesture recognition”. In: *ISPA 2011 - 7th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis* (2011).
- [Hac73] W. Hacker. *Allgemeine Arbeits-und Ingenieurpsychologie: Psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Berlin, Germany: Deutscher Verlag der Wissenschaften, VEB, 1973.
- [Hei+12] Albert Hein u. a. “Gesture Spotting for Controlling a Mobile Assistance System for Service and Maintenance”. In: *GI-Jahrestagung*. Hrsg. von Ursula Goltz u. a. Bd. 208. LNI. GI, 2012, S. 549–560. URL: <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/gi/gi2012.html#HeinLHKN12>.
- [HKL02] Thomas Herrmann, Gabriele Kunau und Kai-Uwe Loser. “Sociotechnical Walkthrough — ein methodischer Beitrag zur Gestaltung soziotechnischer Systeme”. In: *Mensch & Computer 2002*. Hrsg. von Michael Herczeg, Wolfgang Prinz und Horst Oberquelle. Bd. 56. Berichte des German Chapter of the ACM. Vieweg+Teubner Verlag, 2002, S. 323–332. ISBN: 978-3-519-00364-9. DOI: 10.1007/978-3-322-89884-5_33.
- [Hol95] Erik Hollnagel. “Cognitive functions and automation: principles of human-centred automation”. In: *Symbiosis of Human and Artifact - Future Computing and Design for Human-Computer Interaction, Proceedings of the Sixth International Conference on Human-Computer Interaction, (HCI International '95)*. Bd. 20. Advances in Human Factors/Ergonomics. Elsevier, 1995, S. 971–976. ISBN: 9780444817952. DOI: 10.1016/S0921-2647(06)80153-X.
- [Jen09] M. E. Jennex, Hrsg. *Re-Visiting the Knowledge Pyramid: System Sciences, 2009. HICSS '09. 42nd Hawaii International Conference on*. 2009. ISBN: 1530-1605. DOI: 10.1109/HICSS.2009.361.
- [Joh+07] Tristan E. Johnson u. a. “Measuring sharedness of team-related knowledge: Design and validation of a shared mental model instrument”. In: *Human Resource Development International* 10.4 (2007), S. 437–454. ISSN: 1367-8868.
- [JV07] Marcel Adam Just und SASHANK VARMA. “The organization of thinking: What functional brain imaging reveals about the neuroarchitecture of complex cognition”. In: *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* 7.3 (2007), S. 153–191.
- [KB00] E. K. Kelloway und J. Barling. “Knowledge work as organizational behavior”. In: *International Journal of Management Reviews* 2.3 (2000), S. 287–304.

- [KFS15] Oliver Korn, Markus Funk und Albrecht Schmidt. “Assistive Systems for the Workplace”. In: *Assistive Technologies for Physical and Cognitive Disabilities*. Hrsg. von Lau Bee Theng. IGI Global, 2015, S. 121–135. ISBN: 9781466673731. DOI: 10.4018/978-1-4666-7373-1.ch006.
- [Kle+03] Gary Klein u. a. “Macrocognition”. In: *Intelligent Systems, IEEE* 18.3 (2003), S. 81–85. ISSN: 1541-1672.
- [Kle13] Sebastian Klemm. “Kontextualisierte Montageassistenz mit Smartwatches”. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2013.
- [Kok+13] Nicolas Kokkalis u. a. “TaskGenies: Automatically Providing Action Plans Helps People Complete Tasks”. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 20.5 (2013), S. 1–25. ISSN: 10730516. DOI: 10.1145/2513560.
- [Kor+13] Oliver Korn u. a. “The potentials of in-situ-projection for augmented workplaces in production: a study with impaired persons”. In: *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. Paris, France: ACM, 2013, S. 979–984. ISBN: 978-1-4503-1952-2. DOI: 10.1145/2468356.2468531.
- [Kor+14] Oliver Korn u. a. “Context-aware Assistive Systems at the Workplace: Analyzing the Effects of Projection and Gamification”. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. PETRA '14. New York, NY, USA: ACM, 2014, 38:1–38:8. ISBN: 978-1-4503-2746-6. DOI: 10.1145/2674396.2674406. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2674396.2674406>.
- [Krü13] Marco Krüger. “Visuelle Wartungsunterstützung für mobile Einsatzszenarien”. Diplomarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2013.
- [KSH12] Oliver Korn, Albrecht Schmidt und Thomas Hörz. “Assistive systems in production environments: exploring motion recognition and gamification”. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. Heraklion, Crete, Greece: ACM, 2012, S. 1–5. ISBN: 978-1-4503-1300-1. DOI: 10.1145/2413097.2413109.
- [Lai+15] John E. Laird u. a. *The Soar User’s Manual: Version 9.5.0*. 2015. URL: <http://web.eecs.umich.edu/~soar/downloads/Documentation/SoarManual.pdf> (besucht am 07.01.2016).
- [Lai12] John E. Laird. “The Soar Cognitive Architecture”. In: *Artificial Intelligence and Simulation of Behavior Quarterly* 134 (2012), S. 1–4.
- [Ley+13] Tobias Ley u. a. “Scaling Informal Learning: An Integrative Systems View on Scaffolding at the Workplace”. In: *Scaling up Learning for Sustained Impact*. Hrsg. von Davinia Hernández-Leo u. a. Bd. 8095. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 484–489. ISBN: 978-3-642-40813-7. DOI: 10.1007/978-3-642-40814-4_43.

- [Lin+10] Stefanie Lindstaedt u. a. “Providing Varying Degrees of Guidance for Work-Integrated Learning”. In: *Sustaining TEL: From Innovation to Learning and Practice*. Hrsg. von Martin Wolpers u. a. Bd. 6383. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 213–228. ISBN: 978-3-642-16019-6. DOI: 10.1007/978-3-642-16020-2_15. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-16020-2_15.
- [Liu+15] Jian Liu u. a. “Tracking Vital Signs During Sleep Leveraging Off-the-shelf WiFi”. In: *Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. Hangzhou, China: ACM, 2015, S. 267–276. ISBN: 978-1-4503-3489-1. DOI: 10.1145/2746285.2746303.
- [LK13] John D. Lee und Alex Kirlik, Hrsg. *The Oxford handbook of cognitive engineering*. Oxford library of psychology. Oxford University Press, 2013. ISBN: 9780199757183.
- [LLR08] Pat Langley, John E. Laird und Seth Rogers. “Cognitive architectures: Research issues and challenges”. In: *Cognitive Systems Research* 10.2 (2008), S. 141–160. ISSN: 1389-0417.
- [LM13] John E. Laird und Shiwali Mohan. “A Case Study of Knowledge Integration Across Multiple Memories in Soar”. In: *Integrated cognition*. Hrsg. von Christian Lebiere und Paul S. Rosenbloom. Bd. FS-13-03. Technical report. Palo Alto, California: AAAI Press, 2013, S. 32–38. ISBN: 1577356411.
- [LNR87] John E. Laird, Allen Newell und Paul S. Rosenbloom. “Soar: An architecture for general intelligence”. In: *Artificial intelligence* 33.1 (1987), S. 1–64. ISSN: 0004-3702.
- [LW12] Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl, Hrsg. *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. 2. Aufl. 2013. SpringerLink : Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. ISBN: 3642290612.
- [Mas43] Abraham Harold Maslow. “A theory of human motivation”. In: *Psychological review* 50.4 (1943), S. 370.
- [May+11] Marcel Ph. Mayer u. a. “Cognitive Engineering of Automated Assembly Processes”. In: *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. Hrsg. von Don Harris. Bd. 6781. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 313–321. ISBN: 978-3-642-21740-1. DOI: 10.1007/978-3-642-21741-8_34.
- [May+13] Marcel Ph. Mayer u. a. “Systemmodell für Selbstoptimierende Produktionssysteme”. In: *Kognitive Systeme* 2013.1 (2013).
- [MCT09] E. Murphy-Chutorian und M. M. Trivedi. “Head Pose Estimation in Computer Vision: A Survey”. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 31.4 (2009), S. 607–626. ISSN: 0162-8828. DOI: 10.1109/TPAMI.2008.106.

- [MFBS14] S. Mattsson, Å. Fast-Berglund und J. Stahre. “Managing Production Complexity by Supporting Cognitive Processes in Final Assembly”. In: *Proceedings of the 6th Swedish Production Symposium (SPS) 2014*. 2014.
- [ML13] Joachim Meyer und John D. Lee. “Trust, Reliance, and Compliance”. In: *The Oxford handbook of cognitive engineering*. Hrsg. von John D. Lee und Alex Kirlik. Oxford library of psychology. Oxford University Press, 2013, S. 109–124. ISBN: 9780199757183.
- [Nes14] Dmitrijs Nesterenko. “Mobile und situative Informationsverteilung auf verteilten Displays”. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2014.
- [New80] Allen Newell. “Physical Symbol Systems*”. In: *Cognitive Science* 4.2 (1980), S. 135–183. ISSN: 0364-0213. DOI: 10.1207/s15516709cog0402_2. URL: http://dx.doi.org/10.1207/s15516709cog0402_2.
- [Nie01] Helmut M. Niegemann. *Neue Lernmedien: Konzipieren, entwickeln, einsetzen*. 1. Aufl. Huber Psychologie Praxis Lernen mit neuen Medien. Bern: Huber, 2001. ISBN: 3456834489.
- [NMP06] Neelam Naikar, Anna Moylan und Brett Pearce. “Analysing activity in complex systems with cognitive work analysis: concepts, guidelines and case study for control task analysis”. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 7.4 (2006), S. 371–394. ISSN: 1463-922X.
- [OAS12] OASIS. *Reference Architecture Foundation for Service Oriented Architecture Version 1.0*. 2012. URL: <http://docs.oasis-open.org/soa-rm/soa-ra/v1.0/soa-ra.html>.
- [OS10] Reiner Onken und Axel Schulte, Hrsg. *System-Ergonomic Design of Cognitive Automation: Dual-Mode Cognitive Design of Vehicle Guidance and Control Work Systems*. Bd. 235. Studies in Computational Intelligence. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN: 9783642031342. DOI: 10.1007/978-3-642-03135-9. URL: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10359904>.
- [Pav03] Ivan P. Pavlov. *Conditioned Reflexes*. Mineola, NY: Dover Publ., 2003. ISBN: 9780486430935.
- [Pfe09] Sabine Pfeiffer. “Work Based Usability: ERP-Systeme selbst gestalten und optimieren”. In: *Computer und Arbeit* 2009.1 (2009), S. 21–25.
- [PM09] Stacie Petter und Ephraim R. McLean. “A meta-analytic assessment of the DeLone and McLean IS success model: An examination of IS success at the individual level”. In: *Information & Management* 46.3 (2009), S. 159–166. ISSN: 0378-7206.
- [Ras+10] Björn Rasch u. a. *Quantitative Methoden I: [Deskriptive Statistik, Inferenzstatistik, t-Test, Korrelationstechniken, Regressionsanalyse, Formelsammlung, Glossar, Verteilungstabellen]*. 3., erw. Aufl. Bd. Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler ; Bd. 1. Quantitative Methoden. Berlin: Springer, 2010. ISBN: 978-3-642-05271-2.

- [Ras83] Jens Rasmussen. “Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models”. In: *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* 3 (1983), S. 257–266. ISSN: 0018-9472.
- [RB13] E. M. Roth und A. M. Bisantz. “Cognitive Work Analysis”. In: *The Oxford handbook of cognitive engineering*. Hrsg. von John D. Lee und Alex Kirlik. Oxford library of psychology. Oxford University Press, 2013, S. 240–260. ISBN: 9780199757183.
- [Rea90] J. T. Reason. *Human error*. Cambridge [England] und New York: Cambridge University Press, 1990. ISBN: 9780521314190.
- [Rei06] Kersten Reich. *Konstruktivistische Didaktik: Lehr- und Studienbuch mit Methodenpool*. 3., völlig neu bearb. Aufl. Beltz Pädagogik. Weinheim: Beltz, 2006. ISBN: 3407254105. URL: http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2761471&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- [Rei08] Kersten Reich. *Konstruktivistische Didaktik: Lehr- und Studienbuch mit Methodenpool*. 4., durchges. Aufl. Beltz Pädagogik. Weinheim: Beltz, 2008. ISBN: 9783407291134. URL: http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783407291134.
- [Rei98] Kersten Reich. *Die Ordnung der Blicke*. Neuwied, Kriftel und Berlin: Luchterhand, 1998. ISBN: 9783472032281.
- [RPG94] Jens Rasmussen, Annelise Mark Pejtersen und L. P. Goodstein. *Cognitive systems engineering*. Wiley series in system engineering. New York: Wiley, 1994. ISBN: 9780471011989.
- [Rud11] Bernd Rudow. *Die gesunde Arbeit: Arbeitsgestaltung, Arbeitsorganisation und Personalführung*. 2., vollst. überarb. Aufl. BWL 10-2012. München: Oldenbourg, 2011. ISBN: 978-3486584820. URL: <http://dx.doi.org/10.1524/9783486709803>.
- [Rut+14] Michele Ruta u. a. “Semantic-Based Resource Discovery and Orchestration in Home and Building Automation: A Multi-Agent Approach”. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10.1 (2014), S. 730–741. ISSN: 1551-3203. DOI: 10.1109/TII.2013.2273433.
- [RV64] Irvin Rock und Jack Victor. “Vision and Touch: An Experimentally Created Conflict between the Two Senses”. In: *Science* 143.3606 (1964), S. 594–596. DOI: 10.1126/science.143.3606.594.
- [Sch+14] Kristin E. Schaefer u. a. *A Meta-Analysis of Factors Influencing the Development of Trust in Automation: Implications for Human-Robot Interaction*. No. ARL-TR-6984. 2014.
- [Sch13] Axel Schulte. “Kognitive und kooperative Automation zur Führung unbemannter Luftfahrzeuge”. In: *Kognitive Systeme* 2013.1 (2013), S. 1–10.

- [Sch15] Tom Schönfelder. “Einsatz kognitiver Architekturen für die Anleitung vonMontagearbeiten”. Bachelorarbeit. Rostock: Universität Rostock, 2015.
- [SH06] Lothar Sachs und Jürgen Hedderich. *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R : mit 180 Tabellen*. 12, vollst. neu bearb. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer, 2006. ISBN: 978-3-540-32161-3. DOI: 10.1007/978-3-540-32161-3. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32161-3>.
- [She95] T. B. Sheridan. “Human centered automation: oxymoron or common sense?” In: *1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*. 1995, S. 823–828. DOI: 10.1109/ICSMC.1995.537867.
- [Ski76] B. F. Skinner. *About Behaviorism*. [1st ed.] New York: Vintage Books, 1976. ISBN: 9780394716183.
- [TBM97] D. A. Thurman, D. M. Brann und C. M. Mitchell. “An architecture to support incremental automation of complex systems”. In: *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on*. Bd. 2. 1997, S. 1174–1179. DOI: 10.1109/ICSMC.1997.638109.
- [Vic99] Kim J. Vicente. *Cognitive work analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. CRC Press, 1999. ISBN: 1410603032.
- [VMS07] D. Vernon, G. Metta und G. Sandini. “A Survey of Artificial Cognitive Systems: Implications for the Autonomous Development of Mental Capabilities in Computational Agents”. In: *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 11.2 (2007), S. 151–180. ISSN: 1089-778X. DOI: 10.1109/TEVC.2006.890274.
- [Vol74] Walter Volpert. *Handlungsstrukturanalyse als Beitrag zur Qualifikationsforschung*. Pahl-Rugenstein, 1974. ISBN: 3760901786.
- [Wic+10] C. D. Wickens u. a. “Stages and Levels of Automation: An Integrated Meta-analysis”. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 54.4 (2010), S. 389–393. ISSN: 1071-1813. DOI: 10.1177/154193121005400425.
- [Wic13] C. D. Wickens. “Attention”. In: *The Oxford handbook of cognitive engineering*. Hrsg. von John D. Lee und Alex Kirlik. Oxford library of psychology. Oxford University Press, 2013, S. 36–56. ISBN: 9780199757183.
- [WL91] Etienne Wenger und Jean Lave. *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation (Learning in Doing: Social, Cognitive and Computational Perspectives)* by. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1991.

- [YJS06] Alper Yilmaz, Omar Javed und Mubarak Shah. “Object tracking: A survey”. In: *ACM Comput. Surv.* 38.4 (2006). ISSN: 0360-0300. DOI: 10.1145/1177352.1177355. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1177352.1177355>.
- [Zae+12] M. F. Zaeh u. a. “Adaptive Job Control in the Cognitive Factory”. In: *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*. Hrsg. von Hoda A. ElMaraghy. Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 10–17. ISBN: 978-3-642-23859-8. DOI: 10.1007/978-3-642-23860-4_2. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4_2.
- [ZGG04] Philip George Zimbardo, Richard J. Gerrig und Ralf Graf. *Psychologie*. 16., aktualisierte Aufl. Pearson-Studium Ps, Psychologie. München [u.a.]: Pearson, 2004. ISBN: 9783827370563.
- [Zäh+07] M. F. Zäh u. a. “Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage”. In: *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007), S. 9.
- [Ank+13] Ankit Chaudhary u. a. “Intelligent Approaches to interact with Machines using Hand Gesture Recognition in Natural way: A Survey”. In: *CoRR* abs/1303.2292 (2013).
- [Che+14] Chen-Yang Cheng u. a. “Transferring cognitive apprenticeship to manufacturing process knowledge management system: A case study of small- and medium-sized coating industry: VINE”. In: *VINE* 44.3 (2014), S. 420–444. ISSN: 0305-5728. DOI: 10.1108/VINE-03-2013-0011.
- [DIN03] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 8580 Manufacturing processes - Terms and definitions, division*. Berlin, 2003-09.
- [DIN14] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 62264-1:2014-07: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie*. Berlin: Beuth, 2014.
- [Ger90] German Engineers’ Association. *VDI 2860:1990-05 Assembly and handling; handling functions, handling units; terminology, definitions and symbols*. Berlin, 1990.
- [ISA10] ISA Instrumentation, Systems, and Automation Society. *ANSI/ISA-95.00.01-2010 (IEC 62264-1 Mod) Enterprise-Control System Integration: Part 1: Models and Terminology*. ISA, 2010.
- [ISO13] ISO International Organization for Standardization. *IEC 62264-1:2013: Enterprise-control system integration – Part 1: Models and terminology*. ISO, 2013.
- [ISO96] ISO International Organization for Standardization. *Information technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model*. 1996-06-15.

- [Po-+12] Po-Han Wu u. a. “A Context-Aware Mobile Learning System for Supporting Cognitive Apprenticeships in Nursing Skills Training”. In: *Journal of Educational Technology & Society* 15.1 (2012), S. 223–236. ISSN: 11763647, 14364522.
- [VDI07] VDI Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 5600 Teil 1: Fertigungsmanagementsysteme/Manufacturing Execution Systems (MES): ICS 32.240.50*. 2007. Aufl. Berlin: Beuth-Verlag, 2007.
- [VDM09] VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. *Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen: VDMA 66412:2009-10*. 2009. Aufl. Berlin: Beuth-Verlag, 2009.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denen bedanken, die mich fachlich und moralisch auf diesem Weg begleitet und damit zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. So gilt mein Dank zunächst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Bodo Urban. Er hat mich mit seinem fachlichen Rat, mit wertvollen Hinweisen und Geduld unterstützt.

Meiner Familie gilt mein besonderer Dank, insbesondere meiner Frau Michaela, die mir wichtige Freiräume zum Forschen und Schreiben verschafft hat und darüber hinaus verständnis- und liebevoll den familiären Alltag um mich herum organisierte. Meinen Kindern Julian und Lara danke ich dabei für die Abwechslung, die mich insbesondere in kritischen Phasen immer wieder geerdet und zu neuer Schaffenskraft verholfen hat.

Ich danke meinen Kollegen sowie vielen Ehemaligen des Fraunhofer IGD für hochinteressante Diskussionen und motivierende Ratschläge rund um das Thema meiner Arbeit. Dabei sei insbesondere Jörg Voskamp, Gerald Bieber, Petra Müsebeck, Steffen Malo und Sybille Hambach für ihre langjährige und persönliche Unterstützung gedankt. Aber auch meinen Studenten, die zusammen mit mir an diesem Thema gearbeitet haben, soll hier mein herzlicher Dank ausgesprochen werden. Sie haben viele meiner Ideen zum Leben erweckt und so manche Überstunden dafür in Kauf genommen.

Für seine freundschaftliche und bereichernde Zusammenarbeit danke ich vor allem Sebastian Bader. Mit ihm zusammen konnte ich das Thema dieser Arbeit kontinuierlich weiterentwickeln und in gemeinsamen Versuchen sowie Veröffentlichungen zu Ergebnissen führen.

Abschließend möchte ich mich noch einmal bei meiner Frau und bei Nadine Browne für das Lektorieren der Arbeit bedanken sowie bei all denen die nicht genannt aber dennoch ihre Spuren in der Arbeit hinterlassen haben.

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die eingereichte Dissertation selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

22. Mai 2017

Mario Aehnelt

Thesen

1. Kognitive Informationsassistentz ist die technologische Unterstützung der kognitiven Arbeitsprozesse des Menschen. Sie muss als Aspekt der kognitiven Automatisierung betrachtet werden. Diese bezeichnet ein technologisches Verfahren zur kooperativen Verteilung von kognitiven Prozessen, zwischen dem Menschen als Bediener und dem Automatisierungssystem als Assistenzsystem.
2. Der kognitive Arbeitsplatz ist ein Konzept der kognitiven Automatisierung für die manuelle Montage. Es reduziert die kognitive Belastung des Werkers durch Umverteilung von kognitiven Arbeitsaufgaben. Aktuelle Arbeiten zur kognitiven Automatisierung in der manuellen Montage lösen Teilprobleme, arbeiten jedoch mit einem manuellen Arbeitsplan. Die Automatisierung des zur kognitiven Informationsassistentz erforderlichen Informationsflusses zwischen produktionsführenden Systemen und Werker wird nicht thematisiert.
3. Die kognitive Informationsassistentz als Unterstützung für den manuellen Arbeitsprozess der Montage ist der Produktionsleitebene zuzuordnen. Sie ist dort eine Erweiterung der bestehenden MES-Funktionalitäten Datenerfassung, Leistungsanalyse, Informationsmanagement, Feinplanung und -steuerung sowie Qualitätsmanagement. Sie automatisiert den Prozess der Bereitstellung von montagerelevanten Informationen in den Teilschritten der Produktionsplanung und der technischen Dokumentation.
4. Die kognitive Informationsassistentz unterstützt die regel- und wissensbasierte Handlungssteuerung des Werkers während der Ausführung eines Arbeitsganges und damit die operativen Prozesse Informieren, Planen, Handeln, Bewerten und Lernen. Sie vermittelt dem Werker das zur Ausführung eines Arbeitsganges erforderliche Handlungswissen durch die Verknüpfung und Bereitstellung von Fakten, Methoden und Zusammenhängen.
5. Die Wirksamkeit der kognitiven Informationsassistentz ist stark abhängig vom Grad der Verzahnung der Informations-, Kognitions- und Arbeitsprozesse. Durch kognitive Informationsassistentz wird jedoch ausschließlich der Informationsprozess aktiv gestaltet und angepasst, die anderen Prozesse werden damit indirekt beeinflusst. Eine enge Verbindung zwischen dem technischen Informationsprozess und dem menschlichen Kognitionsprozess gelingt nur durch einen adaptiven Lösungsansatz, der die psychologische und die pädagogische Komponente der Zusammenarbeit zwischen dem Menschen und dem Assistenzsystem berücksichtigt.

6. Kognitive Informationsassistentz unterstützt die kognitiven Arbeitsprozesse Denken, Erinnern, Lernen und Speichern durch die Umsetzung von sechs Hauptaufgaben: Bewusstmachen, Führen, Anleiten, Dokumentieren, Überprüfen und Vorbeugen.
7. Die logischen Systeme der kognitiven Informationsassistentz sind die Interaktion mit der Montageumgebung, die digitale Handlungssteuerung, das digitale mentale Modell und die Datenintegration.
8. Das digitale mentale Modell bildet das für die Montage erforderliche Handlungswissen sowie Handlungswissen zur effektiven Zusammenarbeit mit dem Werker ab. Es beinhaltet damit die Grundlagen zur kooperativen Problemlösung als auch eine flexible Anpassung der Zusammenarbeit und Wahrnehmung der Hauptaufgaben kognitiver Informationsassistentz.
9. Die digitale Handlungssteuerung bildet den technologischen Prozess der Analyse, Entscheidung und Planung einer geeigneten Handlungsoption zur Unterstützung des Werkers ab.
10. Kognitive Architekturen eignen sich aufgrund ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise zur Umsetzung des digitalen mentalen Modells sowie der digitalen Handlungssteuerung als Kernkomponenten der kognitiven Informationsassistentz.
11. Kognitive Informationsassistentz führt durch die Unterstützung kognitiver Arbeitsprozesse des Werkers bezogen auf die Zeitdauer, die Qualität der Arbeitsausführung sowie den Wirkungsgrad zu einer quantitativen und qualitativen Verbesserung der physischen Arbeitsprozesse.

Eigene Veröffentlichungen

2016

- Fehling, C.D.; Müller, A.; Aehnelt, M.: *Enhancing Vocational Training with Augmented Reality*. In Proceedings of the 16th International Conference on Knowledge Technologies and Data-driven Business (i-KNOW 2016), Graz, Austria, October 18-19, ACM Press, 2016
- Aehnelt, M.; Bader, S.: *Providing and Adapting Information Assistance for Smart Assembly Stations*. In Proceedings of the 2016 SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys 2016). IEEE, London, UK, 2016; S. 314-323.

2015

- Aehnelt, M.; Bader, S.: *From Information Assistance to Cognitive Automation: A Smart Assembly Use Case*. In (Duval, B. et al. Hrsg.): Agents and artificial intelligence. 7th international conference, ICAART 2015, Lisbon, Portugal, January 10-12, 2015 revised selected papers. Springer, Cham, Heidelberg, 2015; S. 207-222; 10.1007/978-3-319-27947-3_11.
- Aehnelt, M.; Bader, S.: *Information Assistance for Smart Assembly Stations*. In (Loiseau, S. et al. Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2015). SciTePress, Lisbon, Portugal, 2015; S. 143-150; DOI: 10.5220/0005216501430150.
- Aehnelt, M.; Urban, B.: *The Knowledge Gap: Providing Situation-Aware Information Assistance on the Shop Floor*. In (Fui-Hoon Nah, F.; Tan, C.-H. Hrsg.): HCI in Business: Second International Conference, HCIB 2015, Held as Part of HCI International 2015, Los Angeles, CA, USA, August 2-7, 2015, Proceedings. Springer International Publishing, Cham, 2015; S. 232-243; DOI: 10.1007/978-3-319-20895-4_22.
- Alm, R.; Aehnelt, M.; Hadlak, S.; Urban, B.: *Annotated Domain Ontologies for the Visualization of Heterogeneous Manufacturing Data*. In (Yamamoto, S. Hrsg.): Human Interface and the Management of Information. Information and Knowledge Design: 17th International Conference, HCI International 2015, Los Angeles, CA, USA, August 2-7, 2015, Proceedings, Part I. Springer International Publishing, Cham, 2015; S. 3-14; DOI: 10.1007/978-3-319-20612-7_1.

- Alm, R.; Aehnelt, M.; Urban, B.: *Plant@Hand: From Activity Recognition to Situation-based Annotation Management at Mobile Assembly Workplaces*. In (Matthies, D. J. et al. Hrsg.): Proceedings of the 2nd international Workshop on Sensor-based Activity Recognition and Interaction (iWOAR 2015), 2015; DOI: 10.1145/2790044.2790057.
- Aehnelt, M.; Wegner, K.: *Learn but Work! Towards Self-directed Learning at Mobile Assembly Workplaces*. In (Lindstaedt, S.; Ley, T.; Sack, H. Hrsg.): Proceedings of the 15th International Conference on Knowledge Technologies and Data-driven Business. ACM Press, 2015; S. 1-7; DOI: 10.1145/2809563.2809577.
- Alm, R.; Aehnelt, M.; Urban, B.: *Processing Manufacturing Knowledge with Ontology-based Annotations and Cognitive Architectures*. In (Lindstaedt, S.; Ley, T.; Sack, H. Hrsg.): Proceedings of the 15th International Conference on Knowledge Technologies and Data-driven Business. ACM Press, 2015; 25:1-25:6; DOI: 10.1145/2809563.2809576.

2014

- Aehnelt, M.; Bader, S.: *Mobile Informationsassistentz für die Montage*. In (Weidner, R.; Redlich, T. Hrsg.): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen. Verlag der Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg, 2014; S. 370-380.
- Aehnelt, M.; Gutzeit, E.; Urban, B.: *Using Activity Recognition for the Tracking of Assembly Processes: Challenges and Requirements*. In (Bieber, G.; Aehnelt, M.; Urban, B. Hrsg.): WOAR 2014. Workshop on Sensor-based Activity Recognition. Fraunhofer-Verlag; Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2014; S. 12-21; ISBN: 978-3-8396-0792-3.
- Aehnelt, M.; Urban, B.: *Follow-Me: Smartwatch Assistance on the Shop Floor*. In (Nah, F. F.-H. Hrsg.): HCI in Business. Springer International Publishing, 2014; S. 279-287; DOI: 10.1007/978-3-319-07293-7_27.
- Bader, S.; Aehnelt, M.: *Tracking Assembly Processes and Providing Assistance in Smart Factories*. In (Duval, B. et al. Hrsg.): Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ESEO, Angers, Loire Valley, France, 6 - 8 March, 2014. SciTePress, S.l., 2014; S. 161-168; DOI: 10.5220/0004822701610168.
- Bieber, G.; Aehnelt, M.; Urban, B. Hrsg.: WOAR 2014. Workshop on Sensor-based Activity Recognition. Fraunhofer-Verlag; Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2014; ISBN: 978-3-8396-0792-3.

2013

- Aehnelt, M.; Bader, S.; Ruscher, G.; Krüger, F.; Urban, B.; Kirste, T.: *Situation Aware Interaction with Multi-modal Business Applications in Smart Environments*. In (Hutchison, D. et al. Hrsg.): Human Interface and the Management of Information. Information and Interaction for Learning, Culture, Collaboration and Business. 15th International Conference, HCI International 2013, Las Vegas, NV, USA, July 21-26, 2013, Proceedings, Part III. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013; S. 413-422; DOI: 10.1007/978-3-642-39226-9_45.
- Aehnelt, M.; Schulz, H.-J.; Urban, B.: *Towards a Contextualized Visual Analysis of Heterogeneous Manufacturing Data*. In (Bebis, G. et al. Hrsg.): Advances in Visual Computing. 9th International Symposium, ISVC 2013, Rethymnon, Crete, Greece, July 29-31, 2013. Proceedings, Part II. Imprint: Springer, Berlin, Heidelberg, 2013; S. 76-85; DOI: 10.1007/978-3-642-41939-3_8.

2012

- Aehnelt, M.; Peter, C.; Müsebeck, P.: *A Discussion of Using Mental Models in Assistive Environments*. In (Makedon, F. Hrsg.): Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA 2012). ACM, [S.l.], 2012; DOI: 10.1145/2413097.2413145.

2011

- Bieber, G.; Haescher, M.; Peter, C.; Aehnelt, M.; Richter, C.; Gohlke, H.: *Hands-free Interaction mittels Handgelenksensoren für mobile Assistenzsysteme*. In Beiträge des 6. Multimediakongresses Wismar 2011: Netzwerk - Forschung - Innovation, 2011; S. 7.

2010

- Aehnelt, M.: *Contextualized Knowledge Exchange with Mash-up Technologies*. In (Hambach, S. et al. Hrsg.): eLearning Baltics 2010. Proceedings of the 3rd International ELBa Science Conference in Rostock, Germany, July 1 - 2, 2010. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, 2010; S. 143-153.

2009

- Aehnelt, M.: *Learning without Interrupting*. In Proceedings of the 2nd International Conference on E-Learning in the Workplace (ICELW 2009), New York, NY, USA, 2009.
- Aehnelt, M.; Hambach, S.; Müsebeck, P.; Musielak, M.; de Hoog, R.; Kooken, J.; Lindstaedt, S.: *Context and scripts: supporting interactive work-integrated learning*. In (O'Malley, C. et al. Hrsg.): CSCL-09: Proceedings of the 9th international conference on Computer supported collaborative learning - Volume 1. International Society of the Learning Sciences, 2009; S. 144-146.

- Lindstaedt, S. N.; Aehnelt, M.; Hoog, R. de: *Supporting the learning dimension of knowledge work*. In (Cress, U.; Dimitrova, V.; Specht, M. Hrsg.): Learning in the synergy of multiple disciplines. 4th European Conference on Technology Enhanced Learning, EC-TEL 2009, Nice, France, September 29-October 2, 2009 ; Springer, Berlin [u.a.], 2009; S. 639-644.

2008

- Aehnelt, M.; Ebert, M.; Beham, G.; Lindstaedt, S.; Paschen, A.: *A socio-technical approach towards supporting intra-organizational collaboration*. In (Dillenbourg, P.; Specht, M. Hrsg.): Times of convergence. Technologies across learning contexts ; Third European Conference on Technology Enhanced Learning, EC-TEL 2008, Maastricht, the Netherlands, September 16-19, 2008 ; Springer, Berlin, 2008; S. 33-38.

2005

- Aehnelt, M.; Hambach, S.; Riss, U.W.: *Technology for Sharing Learning Content*. In Proceedings of the Training, Education & Simulation International Conference (TESI 2005), Maastricht, the Netherlands, 2005.

2004

- Aehnelt, M.; Hambach, S.: *CSI-Studie: Informationen und Empfehlungen der Content Sharing Initiative zu Modularisierung von Lernmaterial und Learning Object Repositories*. Fraunhofer IGD, 2004.

2003

- Aehnelt, M.: *Personalisierung als Schlüssel zum Erfolg*. In Multimedia & Bildung. Beiträge zu den 4. IuK-Tagen in Rostock, 2003; S.129-140.

2001

- Hambach, S.; Aehnelt, M.: *Telekurse planen und entwickeln*. In Multimedia & Bildung. Beiträge zu den 2. IuK-Tagen in Rostock, 2001.
- Hambach, S.; Urban, B.; Aehnelt, M.; Wallstabe, J.; Voskamp, J.: *From Course Management to Open Learning*. In (Montgomerie, T. C.; Viteli, J. Hrsg.): Proceedings of the World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications 2001 (ED-MEDIA 2001). World conference on educational multimedia, hypermedia and telecommunications, 2001; S. 643-648.